

航空发动机矢量喷管位移传感器冷却研究*

刘友宏¹, 明泽鹏¹, 吴振源¹, 王文山², 李鹏伟², 刘远凯²,
付艳丽², 丁玉林¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 庆安集团有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为了降低典型航空发动机矢量喷管作动器中位移传感器的工作温度, 提出了一种传感器主动冷却结构, 基于真实工况条件建立了传感器热分析计算模型, 编制了FORTRAN程序进行了求解, 搭建了试验台对计算结果准确性进行验证, 探究了工况参数变化对传感器温度的影响。结果表明, 本文编制的传感器热分析程序计算结果具有准确性, 主动冷却结构对传感器的冷却效果明显。活塞杆位置对传感器温度随工况参数变化规律具有明显的影响。冷却介质入口温度对传感器温度影响最大。在活塞杆完全伸出时, 冷却介质入口体积流量对传感器温度的影响大于环境温度; 活塞杆完全收进时, 结果正好相反。

关键词: 航空发动机; 矢量喷管; 位移传感器; 冷却; 热分析

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 04-200335-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200335

Displacement Sensor Cooling of Aero Engine Vectoring Nozzle

LIU You-hong¹, MING Ze-peng¹, WU Zhen-yuan¹, WANG Wen-shan², LI Peng-wei², LIU Yuan-kai²,
FU Yan-li², DING Yu-lin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Qingan Group Co., Ltd, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to decrease the working temperature of displacement sensor on actuator of typical aero engine vectoring nozzle, an active cooling structure of displacement sensor is presented, the displacement sensor heat analysis model is established based on the real working condition, and the Fortran program is compiled to solve the heat analysis model. A test-bed is built in order to verify the accuracy of the analysis model. The effects of working condition parameters' variation on sensor temperature are investigated. The results show that the computational result of heat analysis model is accurate. The active cooling structure has significant cooling effects on displacement sensor. The position of piston rod has obvious effects on the variation of displacement sensor temperature caused by the variation of working condition parameters. The variation of cooling medium entrance temperature has the biggest effects on displacement sensor temperature compared with other working condition parameters. When the piston rod reaches out, cooling medium entrance flowing rate has bigger effects on sensor temperature than environment temperature does, and the conclusion is opposite when the piston rod draws in.

Key words: Aero engine; Vectoring nozzle; Displacement sensor; Cooling; Heat analysis

* 收稿日期: 2020-05-19; 修订日期: 2020-07-24。

通讯作者: 刘友宏, 博士, 教授, 研究领域为工程热物理。

引用格式: 刘友宏, 明泽鹏, 吴振源, 等. 航空发动机矢量喷管位移传感器冷却研究[J]. 推进技术, 2022, 43(4):200335.
(LIU You-hong, MING Ze-peng, WU Zhen-yuan, et al. Displacement Sensor Cooling of Aero Engine Vectoring Nozzle [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(4):200335.)

1 引言

随着航空发动机工作推重比的大幅提升,矢量喷管高温燃气温度升高^[1],作动器是发动机的重要构件,为保证作动器的正常工作,需要对作动器的冷却措施展开研究。在冷却空气量无法大幅增加的情况下,相关研究提出了CCA(Cooled cooling air)法对发动机重要部件进行冷却,在冷却方法过程中,冷却介质受热结焦,从而堵塞冷却介质流动通道是主要技术难点之一^[2],另有研究也说明了发动机中冷却介质超温对于发动机工作时限的影响^[3]。位移传感器(以下简称传感器)是矢量喷管作动器中的重要元组件,虽然传感器自身材料对冷却的需求并不迫切,传感器超温会导致周围冷却介质结焦,从而影响作动器中其它元组件的冷却,因此为保证矢量喷管中作动器在高温环境下正常工作,需要研究传感器的冷却措施。

在公开发表的文献中,国内外对于航空发动机内传感器的研究主要集中于传感器的设计方法与工程应用上。何秀然等^[4]设计了一种基于硬件电路的数字式自整角机位移传感器,结合了硬件电路式测量法的可靠性和软件式测量法易于数字化的优点,传感器响应速度快,抗干扰能力强,对提高发动机控制品质具有重要意义。胡肖璐等^[5]提出了使用AD698激励位移传感器采集信号的方法,可靠性高,具有一定的工程参考价值。宋培培^[6]提出了利用传感器测量转子弯曲度的方法,该方法与试验验证结果吻合良好。王培铭^[7]利用光纤的传光特性设计了一种用于测量发动机内篦齿间隙的传感器。航空发动机叶片表面形状复杂,利用激光测量传感器测距会造成明显的倾斜误差。Sun等^[8]通过光路分析,提出了传感器测量结果修正数学模型,有效提高了传感器测量准确度。Asei^[9]提出了采用激光式位移传感器测量风洞中压强感应膜高度,从而在试验中高效测量压强分布的方法。Duan等^[10-11]研究了利用贴附于涡轮叶片的薄膜式传感器测量叶片温度分布的方法,包括对传感器自身的研究和对叶片涂层降低对传感器工作干扰的研究,薄膜式传感器测量无需冷却系统,但是该方法并不适用于位移传感器。Nikhil D Agarwal等^[12]提出了将航空发动机中的微光子位移传感器应用于无损材料特性测量的方法。

相关文献对传感器的冷却进行了研究。Chang^[13]初步设计了一套传感器主动冷却结构,并通过试验得到了作动器活塞杆完全伸出时结构内部冷却介质

温度、压强、对流换热系数等参数分布情况随入口温度、入口流量、环境温度的变化规律,并未指出传感器温度变化规律,也未考虑活塞杆收进对冷却性能的影响。文献[14-16]对矢量作动器电磁阀、伺服阀、传感器的冷却结构在不同工作模式下的冷却性能进行了热分析研究,但是并未与试验结果进行对比,无法验证数值计算结果的准确性。

为降低典型矢量喷管作动器中传感器的温度,防止周围的冷却介质结焦,本文提出了一种可行的传感器冷却结构,同时针对该冷却结构建立了热分析模型,编写了热平衡方程组的迭代求解程序。为研究传感器温度随作动器研究参数的变化规律,分别在作动器活塞杆完全伸出、作动器活塞杆完全收进时,改变冷却介质入口温度、冷却介质入口体积流量、环境温度,通过求解控制方程组,分别得到了活塞杆完全伸出、活塞杆完全收进工况下的传感器温度随冷却介质入口温度、冷却介质入口体积流量、环境温度的变化规律,并比较了活塞杆完全伸出、完全收进对传感器温度变化规律带来的影响。

2 数值方法与试验验证

2.1 传感器冷却结构

本文以应用于典型轴对称矢量喷管的电液伺服式作动器作为研究对象,对A9喷口作动器在高温热环境下的冷却展开研究。作动器安装示意图如图1所示,作动器被安装于加力燃烧室筒体上,位于加力燃烧室与飞机蒙皮之间的空间内,加力燃烧室筒体、飞机蒙皮、作动器周围热空气共同组成作动器的热环境。

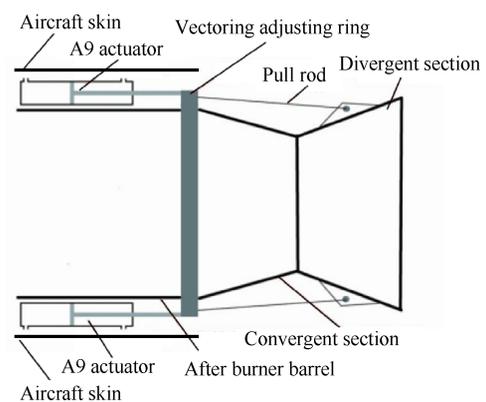


Fig. 1 Installment diagram of A9 actuator

典型作动器内部结构示意图如图2所示。传感器盖板、壳体、固支端共同起到对传感器的固定作用,传感器盖板与传感器壳体间的空气夹层具有一

定隔热效果;活塞、活塞杆筒体是作动器的运动件,由活塞两端介质压差驱动;作动筒衬套、衬套压盖与活塞杆筒体直接接触,起到对运动件的支撑作用;作动筒筒体作为结构总体框架,对上述部件起到总体支撑作用;活塞密封件保证工质不与活塞杆筒体内的传感器接触,同时保证活塞两侧介质不相互流通。

因为矢量喷管作动器的热环境温度高,大大超过了传感器的最高工作温度 T_{allow} ,在没有冷却结构存在时,热平衡状态下的传感器温度最终会达到环境温度,从而引起传感器超温。为此,本文提出在活塞两侧介质间增设流道,利用作动器中流动的介质来冷却传感器的方法,并设计了相应的冷却结构对传感器

进行主动热防护。如图 3 所示为无主动冷却结构和有主动冷却结构的传感器周围结构对比。图 3(a)为无主动冷却结构的传感器周围结构示意图。传感器位于活塞筒体内,活塞密封件将传感器与介质隔绝,传感器周围没有冷却介质流动。图 3(b)所示为有主动冷却结构传感器周围结构示意图,去除活塞密封件;在活塞杆筒体内侧增加冷却衬套;在活塞上开小孔。冷却衬套及周围结构共同构成传感器主动冷却结构。冷却衬套与活塞杆筒体间构成活塞杆筒体间隙;冷却衬套与传感器间构成传感器间隙。传感器间隙、活塞杆筒体间隙、小孔共同构成主动冷却结构中的冷却介质流道,使活塞两侧工质在传感器周围流动,从而作为冷却介质对传感器进行主动冷却。

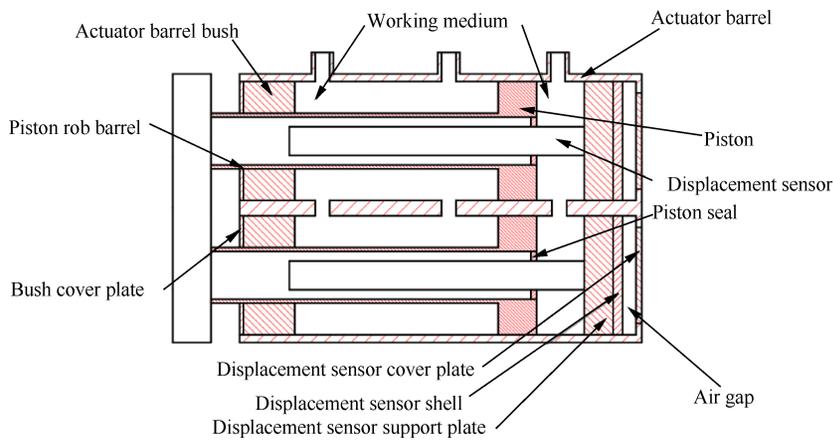
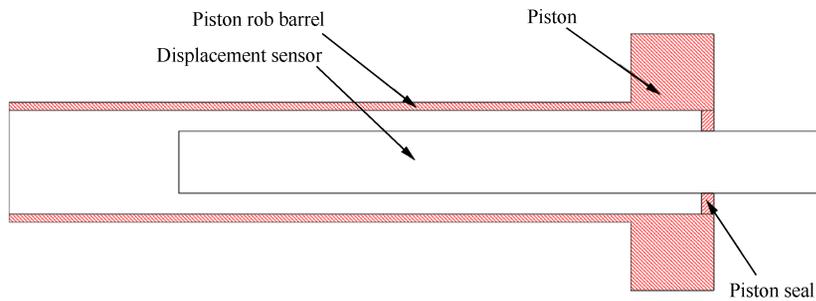
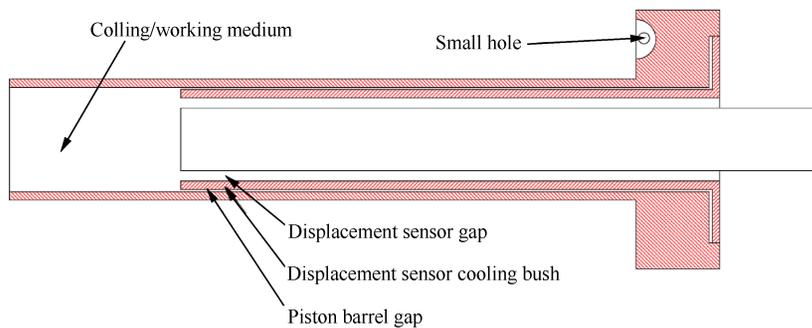


Fig. 2 Schematic diagram of typical actuator structure



(a) Displacement sensor without active cooling structure



(b) Displacement sensor with active cooling structure

Fig. 3 Schematic diagram of displacement sensor surrounding without/with active cooling structure

推动活塞杆移动的压差大于为冷却油路提供足够流量冷却介质所需压差^[14],且在正常工作情况下,活塞杆基本保持静止,冷却介质流道基本不会对作动器液压性能造成影响。图4所示为带有主动冷却结构的作动器内部结构示意图。

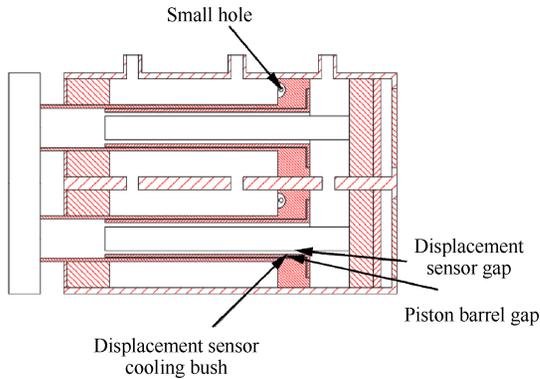


Fig. 4 Schematic diagram of actuator structure with active cooling structure

图5为活塞杆完全伸出、完全收进工况下冷却介质在作动器内部的流动方向示意图。图5(a),5(b)分别为活塞杆完全伸出、完全收进时的作动器内冷却介质流动情况。当活塞杆完全伸出时,冷却介质由左侧通道流入作动器,在推动活塞的同时,一部分冷却介质通过小孔流入活塞杆筒体间隙,然后流入传感器间隙,带走传感器的热量,流出活塞杆,并从右侧通道流出作动器,当活塞杆完全收进时,冷却介质流动方向正好相反。

2.2 传感器冷却热分析数学模型

对于作动器内各部分的导热过程,导热公式^[17]

$$\Phi_d = A_d \lambda_d \Delta T_d / \delta_d \quad (1)$$

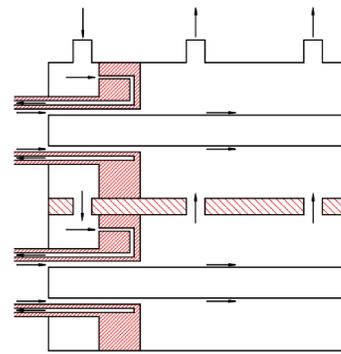
式中 Φ_d 是作动器各部分的导热热量; A_d 是导热处的导热面积; λ_d 是导热处的导热系数; ΔT_d 是导热处的温差; δ_d 是导热处的冷却结构各部分的壁面厚度。

作动器内的对流换热过程包括:热环境与作动器的对流换热、筒体内冷却介质与作动器的对流换热、冷却结构内冷却介质与作动器的对流换热。对流换热公式^[17]为

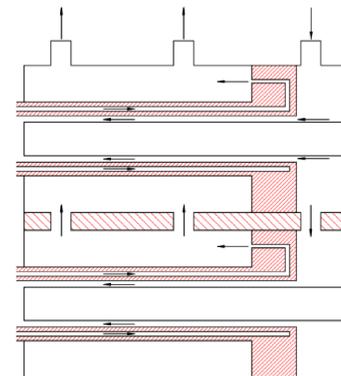
$$\Phi_c = h_c A_c \Delta T_c \quad (2)$$

式中 Φ_c 是作动器各部分的对流换热热量; h_c 是对流换热处的对流换热系数; A_c 是对流换热处的对流换热面积; ΔT_c 是对流换热处的温差。热环境与作动器的对流换热系数由相关工程经验确定。

由于作动器内的冷却介质流动处于过渡区范



(a) Cooling medium flow direction under piston out mode



(b) Cooling medium flow direction under piston in mode

Fig. 5 Schematic diagram of cooling medium flow direction under piston in/out mode

围,且受到入口段影响,因此筒体内冷却介质与作动器的 Nusselt 数由格尼林斯基公式推导得出

$$Nu = 0.012 \times (Re^{0.87} - 280) \times Pr^{0.4} \times [1 + (d/l)^{2/3}] \quad (3)$$

式中 Nu 是流道 Nusselt 数; Re 是流道雷诺数; Pr 是流道普朗特数; d 是流道特征直径; l 是流道长度。

由于活塞杆内的冷却介质处于层流范围,且受到入口段影响,因此冷却结构内冷却介质与作动器的 Nusselt 数由齐德-泰勒公式推导得出

$$Nu = 1.86 \times \left(\frac{Re \times Pr}{l/d} \right)^{1/3} \quad (4)$$

对流换热系数为

$$h = \frac{Nu \times \lambda}{d} \quad (5)$$

式中 h 是对流换热系数; λ 为边界附近流体导热系数。

由于热空气为非辐射参与型介质,热环境辐射换热过程主要包括飞机蒙皮、加力筒体对作动器的辐射传热。辐射传热公式^[17]为

$$\Phi_{env-ac} = \varepsilon_{ac} X_{env-ac} A_{env} \varepsilon_{env} \sigma (T_{env}^4 - T_{ac}^4) \quad (6)$$

式中 Φ_{env-ac} 是热环境对作动器的辐射传热; ε_{ac}

是作动器发射率; X_{env-ac} 是热环境到作动器接收面的角系数; A_{env} 是发射辐射表面的面积; ϵ_{env} 是热环境发射率; σ 是 Stefan-Boltzmann 常数; T_{env} 是热环境温度; T_{ac} 是热辐射接收面温度。

图 6 所示为作动器热分析计算程序流程图。通过分析作动器不同部位的导热、对流换热、辐射换热过程, 并通过迭代计算, 使作动器各处温度逐渐收敛, 最终求得相应工况参数下的温度分布情况。图 6 中 Φ 为作动器各部分热流量; T 为作动器各部分温度; R 为可判定温度为收敛的变化率。下标 gb 代表传感器盖板; air 代表盖板、壳体间空气间隙; kt 代表传感器壳体; td 代表固支端; yg 代表衬套压盖; ct 代表作动器衬套; tc 代表作动筒筒体; hs 代表活塞; m 代表冷却介质。

2.3 计算结果准确性验证试验台

本研究的传感器冷却热分析数学模型将作动器及其中的冷却结构的导热过程、对流换热辐射传热过程进行了简化, 计算结果会与实际情况产生偏差, 为验证数学模型计算结果的准确性, 本研究使用作动器高温部件热试验台, 分别在作动器试验件活塞杆完全伸出、完全收进时选取一组工况进行试验, 并将试验结果与数学模型计算结果进行对比。

图 7 为部件级高温热环境综合试验台流程图。试验台由三部分组成, 分别是: 冷却介质供应系统、加热冷却系统、温度测量系统。

在冷却介质供应系统由冷却介质储存罐、冷却介质回收罐、2 个换热器(分别加热和冷却冷却介质)、泵、流量计、冷却介质过滤器、以及相关的管道

和阀门构成, 通过调节试验台不同部件以控制冷却介质进入试验件的流量。

加热冷却系统由导热油罐、冷却水收集罐、电加热器、恒温箱以及相关的管道、阀门、泵构成, 通过热交换器控制冷却介质进入试验件的温度, 通过加热恒温箱中的空气直接控制试验件的环境温度。

温度测量系统由恒温箱、传感器中不同位置处理下的热电偶和记录热电偶测量数据的采集系统所共同构成, 由自行设计的应用软件对测量数据进行分析处理。通过 PT100 热电阻测量冷却介质进入试验件的温度, 测量范围为 0~150℃, 最大不确定度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。通过 LZ 系列、LWGW 系列流量计测量冷却介质进入试验件的流量, 测量范围分别为 6~60L/h, 2~200L/h, 在满量程 10%~100% 内测量误差分别为 0.5%, 1.0%; 在满量程 2%~10% 内测量误差分别为 0.3%, 0.8%。位移传感器壁温通过 K 型热电偶丝测量, 测量范围为 0~300℃, 最大不确定度为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。

3 结果与分析

数值计算及试验结果以传感器最大允许工作温度 T_{allow} 对作动器内各处温度、环境温度、冷却介质入口温度进行无量纲化处理, 以额定工况下的冷却介质入口体积流量 V_i 对冷却介质入口体积流量进行无量纲化处理。

3.1 数学模型计算结果准确性验证

在活塞杆完全伸出时, 选取 16 组试验工况进行计算结果准确性对比, 试验工况参数取值如表 1 所示。在保持冷却介质入口体积流量 $0.817V_i$, 环境温

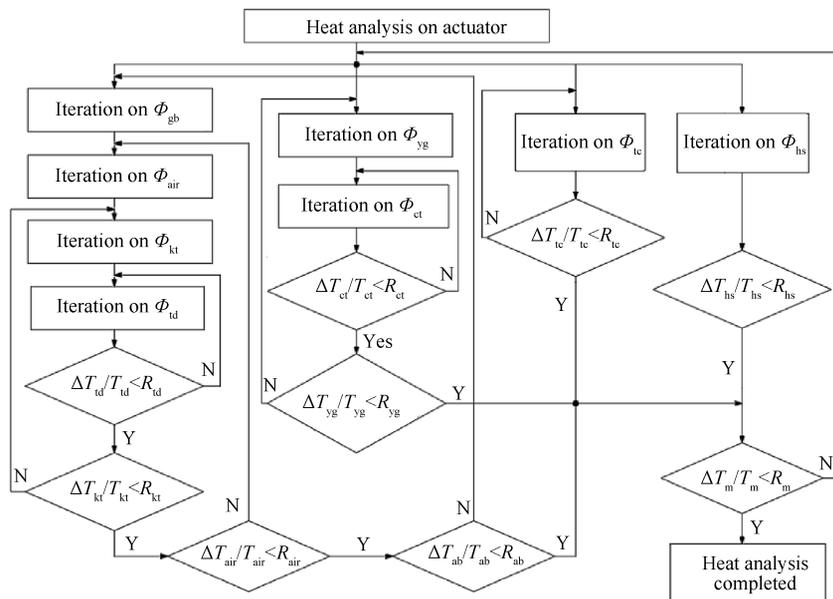


Fig. 6 Flow chart of actuator heat transfer analysis

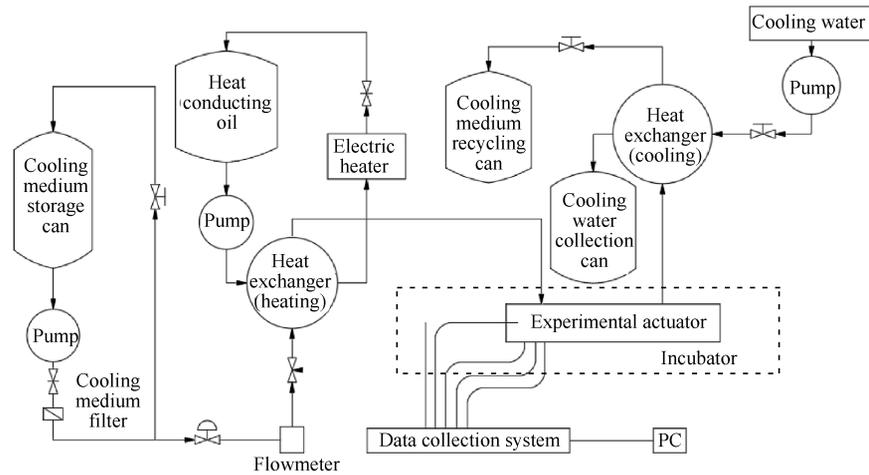


Fig. 7 Schematic diagram of component-level high temperature thermal environment synthetic test-bed

度 $1.236T_{allow}$ 时,冷却介质入口温度取值范围为 $0.804\sim 0.905T_{allow}$,以保证在传感器正常工作的温度范围内提高冷却介质试验温度,验证数学模型计算结果在恶劣冷却工况下的准确度,确保热分析数学模型的可靠性。

试验结果与数学模型计算结果对比如图8所示。结果表明,当活塞杆完全伸出时,数学模型计算结果与试验结果均随冷却介质入口温度增加而基本呈线性增加,变化规律基本相同,且计算结果与试验结果在研究范围内的最大相对误差仅为1.2%,吻合良好。

当活塞杆完全收进时,选取18组试验工况进行计算结果准确性对比,试验工况参数取值如表2所示。在保持冷却介质入口体积流量 $0.783V_f$,环境温度 $1.236T_{allow}$ 时,冷却介质入口温度取值为 $0.805\sim 0.909T_{allow}$ 。

试验结果与数学模型计算结果对比如图9所示。结果表明,当活塞杆完全收进时,数学模型计算结果与试验结果均随冷却介质入口温度增加而基本呈线

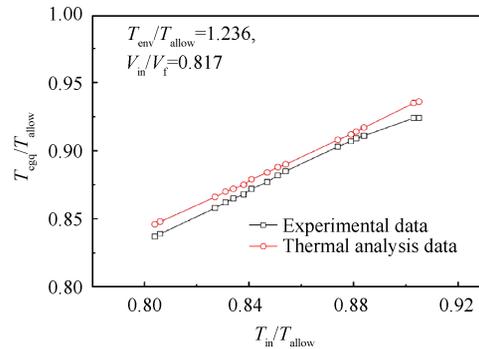


Fig. 8 Comparison between experimental results and heat analysis calculating results under piston out mode

性增加,变化规律基本相同,且计算结果与试验结果在研究范围内的最大相对误差仅为1.1%,吻合良好。

3.2 传感器冷却结构冷却效果

表3为额定工况下的冷却介质入口温度、冷却介质入口体积流量、环境温度。在额定工况下,无冷却结构、带有冷却结构时的传感器温度由传感器冷却热分析数学模型计算,并使用柱状图进行比较,如图10所示。

Table 1 Experimental working condition under piston out mode

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
T_{in}/T_{allow}	0.804	0.806	0.827	0.831	0.834	0.838	0.841	0.847	0.851	0.854	0.874	0.879	0.881	0.884	0.903	0.905
V_{in}/V_f	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817
T_{env}/T_{allow}	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236

Table 2 Experimental working condition under piston in mode

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
T_{in}/T_{allow}	0.805	0.808	0.816	0.828	0.834	0.838	0.843	0.847	0.851	0.855	0.860	0.864	0.870	0.882	0.889	0.896	0.902	0.909
V_{in}/V_f	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783
T_{env}/T_{allow}	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236	1.236

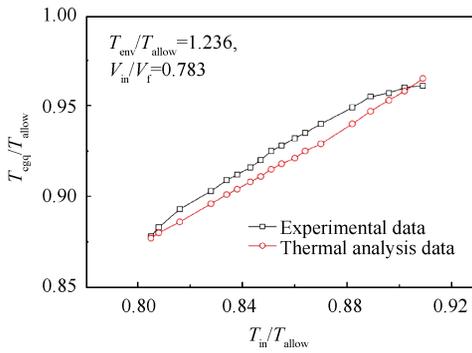


Fig. 9 Comparison between experimental results and heat analysis calculating results under piston in mode

Table 3 Rated working condition parameters

Parameter	T_{in}	V_{in}	T_{env}
Value	0.811	1.000	1.236

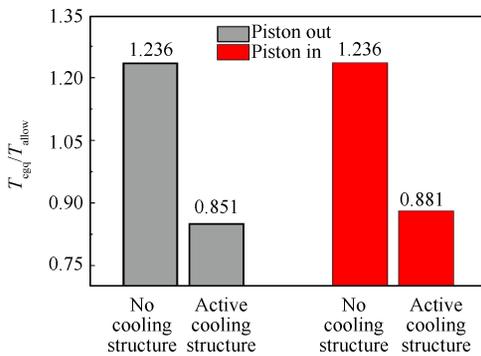


Fig. 10 Cooling effect of active cooling structure under piston out/in mode

在无冷却结构时,传感器温度大于 $1.0T_{allow}$,超出传感器最大允许工作温度;在带有冷却结构时,传感器温度小于 $1.0T_{allow}$,未超出传感器最大允许工作温度,本文所设计主动冷却结构可保证传感器正常工作。当活塞杆完全伸出时,有冷却结构时传感器温度相比于无冷却结构时减小 31.1%;当活塞杆完全收进时,减小幅度为 28.7%。活塞杆完全收进工况下,冷却结构的效果小于活塞杆完全伸出工况。

3.3 冷却介质入口温度对传感器温度的影响

图 11 为传感器温度随冷却介质入口温度变化规律。传感器温度随冷却介质入口温度的增加而基本呈线性增加,这种趋势是由于传感器与冷却介质的热量传递方式为对流换热,根据式(2),传感器温度应随冷却介质入口温度的增加线性增加。相同工况下,活塞杆收进时传感器温度恒大于伸出状态,这是由于活塞杆完全收进状态下作动器内部结构不利于冷却介质在冷却结构中流通,从而导致在相同冷却介质入口流量工况下,活塞杆完全收进时能够有效

冷却传感器的冷却介质流量小于活塞杆完全伸出工况,从而导致收进工况传感器温度大于伸出工况,下文同理。在活塞杆完全伸出时,传感器温度变化幅度为 13.4%,变化斜率为 $0.901T_{csq}/T_{in}$;在活塞杆完全收进时,传感器温度的变化幅度为 12.2%,变化斜率为 $0.845T_{csq}/T_{in}$,活塞杆完全伸出工况下的冷却介质入口温度变化对传感器温度的影响大于活塞杆完全收进工况,如上文所述,活塞杆伸出时能够有效冷却传感器的冷却介质流量大于活塞杆收进工况,因此伸出工况冷却介质入口温度变化对传感器热量传递的影响大于收进工况,进而使冷却介质入口温度对传感器温度变化的影响增大。

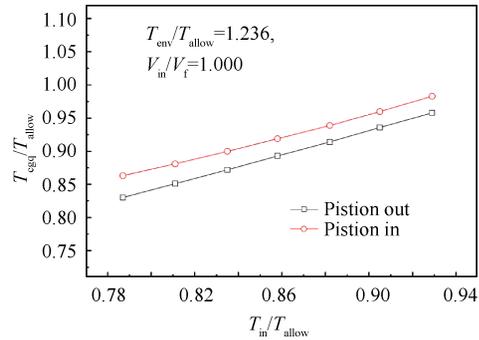


Fig. 11 Trend of displacement sensor temperature with the variation of cooling medium entrance temperature

3.4 冷却介质入口体积流量对传感器温度的影响

图 12 为传感器温度随冷却介质入口体积流量变化规律。传感器温度随冷却介质入口体流量的增加而降低,且降低趋势逐渐趋于平缓,这种趋势是由于冷却介质同时与冷却结构和传感器对流换热,根据式(2),当冷却介质体流量增加,冷却介质带走传感器热量与热环境向传感器传递热量均增加,传感器温度应随冷却介质体流量的增加而减小,且减小速度逐渐放缓。活塞杆完全伸出时,传感器温度的变化幅度为 2.3%;在活塞杆完全收进时,传感器

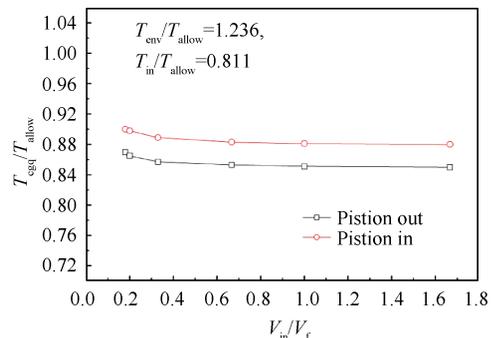


Fig. 12 Trend of displacement sensor temperature with the variation of cooling medium entrance volume flow rate

温度的变化幅度为2.2%，活塞杆位置对冷却介质流量对传感器温度的影响基本相同。

3.5 环境温度对传感器温度的影响

图13为传感器温度随环境温度变化规律。传感器温度随环境温度的增加而基本呈线性增加,这种趋势是由于热环境通过对流换热和辐射换热向冷却结构传递热量,环境温度不高,对流换热为热环境向冷却结构主要热量传递方式,根据式(2),传感器温度应随环境温度增加而线性增加。在活塞杆完全伸出时,传感器温度的变化幅度为1.7%,变化斜率为 $0.091T_{\text{egq}}/T_{\text{env}}$;在活塞杆完全收进时,传感器温度的变化幅度为2.9%,变化斜率为 $0.158T_{\text{egq}}/T_{\text{env}}$,活塞杆完全伸出工况下的环境温度变化对传感器温度的影响大于活塞杆完全收进工况,如上文所述,活塞杆伸出时能够有效冷却传感器的冷却介质流量大于活塞杆收进工况,冷却条件更加良好,因此,环境温度变化对完全伸出工况的影响更小。

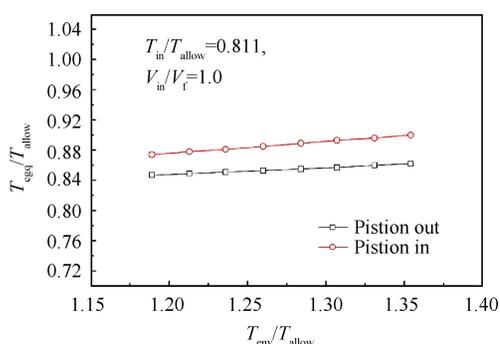


Fig. 13 Trend of displacement sensor temperature with the variation of ambient temperature

在活塞杆完全伸出时,冷却介质入口温度变化对传感器温度的影响程度是冷却介质入口体积流量的5.8倍,是环境温度的7.9倍,对于传感器温度的影响,冷却介质入口温度最大、环境温度次之、冷却介质入口体积流量最低;在活塞杆完全收进时,冷却介质入口温度变化对传感器温度的影响程度是冷却介质入口体积流量的5.5倍,是环境温度的4.2倍,对于传感器温度的影响,冷却介质入口温度最大、冷却介质入口体积流量次之、环境温度最低。

4 结论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)本文传感器热分析数学模型计算结果具有准确性。

(2)主动冷却结构对传感器冷却效果明显,活塞杆完全伸出时的冷却效果大于活塞杆完全收进,收进工况下的冷却条件比伸出工况恶劣。

(3)传感器温度随冷却介质入口温度、环境温度的增加基本呈线性增加;传感器温度随冷却介质入口体积流量增加逐渐减小,且减小速度逐渐放缓。

(4)冷却介质入口温度变化对活塞杆完全伸出工况下的传感器温度的影响程度大于活塞杆完全收进工况;冷却介质入口体积流量变化对传感器温度的影响程度与活塞杆状态无关;环境温度变化对活塞杆完全收进工况下的传感器温度的影响程度大于活塞杆完全伸出工况。

(5)活塞杆完全伸出时,工况参数对传感器温度影响程度从大到小依次为冷却介质入口温度、环境温度、冷却介质入口体积流量;活塞杆完全收进时,影响程度从大到小依次为冷却介质入口温度、冷却介质入口体积流量、环境温度。

参考文献

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [2] 朱 锟, 邓宏武, 王英杰, 等. 超临界压力下航空煤油结焦换热综述及实验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2472-2478.
- [3] Edwards Tim, Harrison William, Zabarnick S, et al. Update on the Development of JP-8+100[R]. AIAA 2004-3886.
- [4] 何秀然, 谢寿生, 钱 坤. 数字角位移传感器在航空发动机系统中的应用研究[J]. 电光与控制, 2006, 13(2): 75-78.
- [5] 胡肖璐, 樊 丁, 彭 凯. 航空发动机位移信号测量系统设计与实现[J]. 测控技术, 2013, 32(2): 122-125.
- [6] 宋培培. 航空发动机转子不同心故障振动机理分析及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [7] 王培铭. 基于PMAC卡的航空发动机篦齿间隙测量系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [8] Sun B, Li B. Laser Displacement Sensor in the Application of Aero-Engine Blade Measurement [J]. Sensors Journal IEEE, 2016, 16(5): 1377-1384.
- [9] Asei Tezuka. Validation Study of Pressure-Measurement System with Laser Displacement Sensor and Film [R]. AIAA 2008-272.
- [10] Duan Franklin Li, Hu Ming-kai, Ding Gui-fu, et al.

- Development of Accurate and Robust High Temperature Sensor on Aero-Engine Turbine Blade Surface[R]. *AIAA* 2018-4622.
- [11] Duan Franklin Li, Weng Hao-tian, Ji Zhong-lin, et al. Study of Electrical Properties of Thermal Barrier Coating under High Temperatures for Aero-Engine Smart Sensors [R]. *AIAA* 2019-4087.
- [12] Nikhil D Agarwal, Dustin Zittlow, Edoardo Rubino. Analysis of a Whispering Gallery Mode Based Displacement Sensor[R]. *AIAA* 2020-0713.
- [13] Chang Zheng-ze. Heat Transfer Experimental Investigation for Piston Rod Sensor in Hydraulic Servo Actuator of Hypersonic Combustion Ramjet Engine Vectoring Nozzle [R]. *AIAA* 2017-2128.
- [14] 刘友宏, 丁玉林, 罗一夫. 航空发动机矢量喷管作动器伺服阀非稳态热分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(3): 313-319.
- [15] 刘友宏, 丁玉林, 常正则, 等. 发动机矢量喷管作动器电磁阀非稳态热分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 285-289.
- [16] 刘友宏, 丁玉林, 孙明月. 作动器位移传感器常规工况热防护研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 294-298.
- [17] 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(编辑:张 贺)