

某涡轮氧泵轴向力传感器的密封防护设计与实现

石荣武 姚龙 白新玉 余康 介鹏 中航电测仪器股份有限公司

【摘要】本文介绍了在 2MPa 水压试验环境中的某涡轮氧泵轴向力传感器的结构设计，阐述了其密封防护设计方法，最后，通过试验测试表明该涡轮氧泵轴向力传感器测量准确、密封防护设计实现了预期要求，保障了某航天重型发动机的顺利研制。

【关键词】轴向力、传感器、密封防护

引言

某航天重型发动机涡轮氧泵在输送液氧的工作过程中，若涡轮氧泵轴向力平衡系统调整不准，试验中轴承承受载荷过大，将导致轴承破坏引起涡轮氧泵损毁，因此涡轮氧泵的轴向力平衡系统决定着试验的安全性。由于该发动机涡轮氧泵工作压力高、结构复杂等因素，使得难以通过仿真计算准确获得涡轮氧泵转轴的轴向工作载荷，这就要求在某航天重型发动机涡轮氧泵水力地面试验时，该轴向力传感器能够实时准确测量高速旋转的涡轮氧泵轴的轴向力，即测量该发动机涡轮氧泵轴的支撑轴承的轴向力。

某涡轮氧泵轴向力传感器被测最大轴向力约为 30kN，其使用环境复杂、工作温度范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$ 、工作环境水介质压力为 2MPa、安装空间极小。该轴向力传感器的结构设计和密封防护是实现准确测量的关键，对某航天重型发动机的顺利研制具有十分重要的意义，本文对该轴向力传感器的结构设计和密封防护等方面进行了阐述。

一、结构设计

该轴向力传感器依据电阻应变原理^[1]设计，主要由弹性体、O 型密封圈、密封外壳、电缆锁固管、橡胶密封套、电缆线、电阻应变计以及惠斯通电桥等组成，轴向力传感器设计及安装结构见图 1。

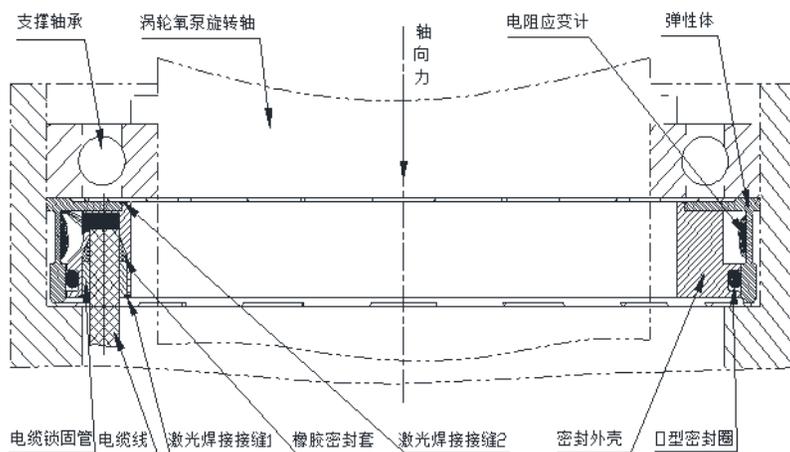


图 1 轴向力传感器结构及安装图

如图 1 所示，高速旋转的涡轮氧泵轴支撑于轴承内圈，同轴承安装壳体内壁间隙配合的轴承外圈支撑于轴向力传感器弹性体一端，轴向力传感器弹性体另一端支撑于轴承安装壳体内。当高速旋转的涡轮氧泵轴施加一定的力给轴承内圈时，该力传递给轴承外圈，其克服与安装壳体内壁配合面的摩擦力（已知轴承安装壳体内壁同轴承外圈间隙配合引起的轴向摩擦力为一恒定值，为 2kN）后，将轴向力传递给轴向力传感器弹性体，而使粘贴于弹性体线弹性应变敏感区的电阻应变计因感受应变而产生电阻变化，再通过电阻应变计组成的惠斯通电桥电路输出同被测力成比例关系的电压信号。需要指出的是环境介质压力可精确测量获得，环境介质对该轴向力传感器的轴向压力大部分已被轴向力传感器的密封外壳平衡，环境介质对该轴向力传感器弹性体测量轴向正交方向的有效加压面积为 1000mm^2 ，环境介质压力 2MPa 对该轴向力传感器弹性体的轴向附加力为 2kN。环境介质相对轴向压力引起的该轴向力传感器的输出为定值，同理，环境介质相对径向压力引起的该轴向力传感器的输出也为定值，因此环境介质压力一定时引起的该轴向力传感器的输出也为定值，该值可以通过标定获得，本文将不再讨论环境介质压力对测量的影响。

轴向力传感器的弹性体采用 05Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢材料^[2]，抗拉强度 σ_b 为 1310MPa，并选用箔式电阻应变计作为敏感元件。使用 ANSYS 有限元软件^[3]以轴向力传感器的弹性体受 35kN 的轴向力载荷进行强度设计分析，轴向力传感器的弹性体设计结构及边界条件见图 2，上下边界均设计有凸起结构，有利于提高弹性应变敏感区的应力水平。分析的轴向压应力云图见图 3、径向拉应力云图见图 4，知弹性体线弹性应变敏感区的轴向压应力 $\delta_{压}$ 为 -170MPa、弹性体线弹性应变敏感区的径向拉应力 $\delta_{拉}$ 约为 12MPa，最大应力为压应力 -272.43MPa，远小于抗拉强度 1310MPa，轴向力传感器的弹性体结构在线弹性范围内，故轴向力传感器的弹性体结构满足强度要求，安全可靠。

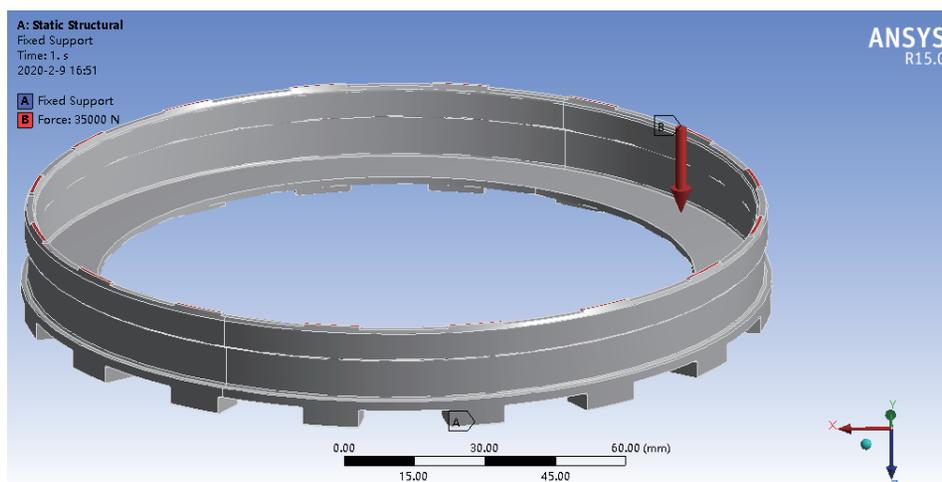


图 2 轴向力传感器弹性体 Ansys 分析受力及边界条件

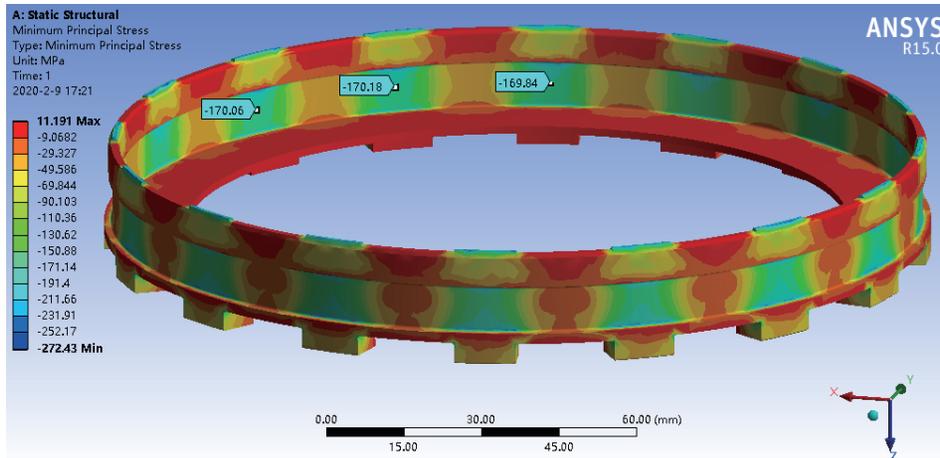


图 3 轴向力传感器弹性体 Ansys 分析轴向压应力云图

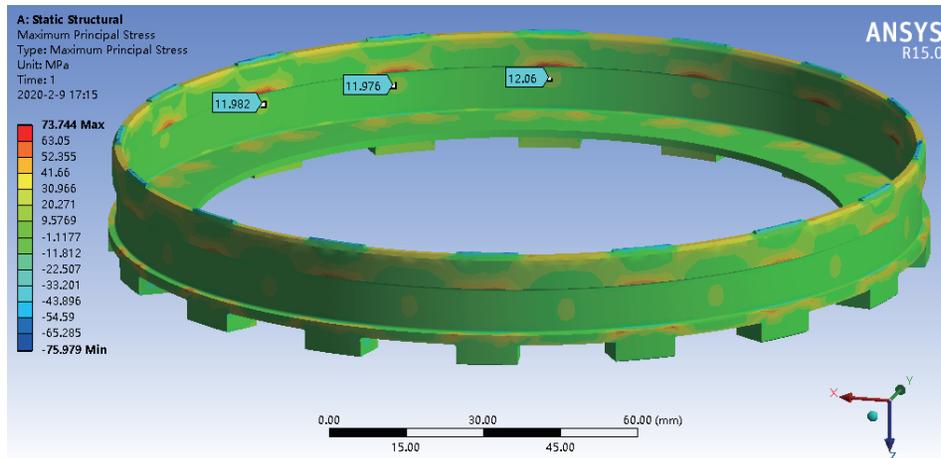


图 4 轴向力传感器弹性体 Ansys 分析径向拉应力云图

考虑到横向效应，不锈钢 05Cr17Ni4Cu4Nb 材料泊松比取值为 0.29、弹性模量 E 取值为 210GPa，力传感器输入电阻 R_{in} 取值 383Ω 、输出电阻 R_o 取值 350Ω ，电阻应变计的灵敏系数 k 取值为 2.08。轴向力传感器量程为 30kN 时的输出灵敏度 S 为：

$$S = \frac{U_o}{U_i} = \frac{(1+\mu) \times k R_o (\delta_{拉} - \delta_{压})}{2 \times R_{in} E} \quad (1)$$

式中， U_o 为轴向力传感器输出电压 /mV， U_i 为轴向力传感器的输入电压 /V。

由公式 (1) 可知，该轴向力传感器的输出灵敏度 S 为 0.9107mV/V。

二、密封防护设计

如果轴向力传感器的密封防护不好，就会导致惠斯通电桥绝缘电阻下降，影响产品性能，进而不能够保证其在试验中对轴向力的可靠测量，因此密封防护设计极为关键。下面从轴向力传感器的密封结构设计和惠斯通电桥电路的防护设计来说明其密封防护。

如图 1 所示，轴向力传感器的主要密封结构是由弹性体、密封外壳、电缆锁固管、O型密封圈、

橡胶密封套和电缆线构成的密封结构。

设计时定制专用耐 10MPa 介质压力的屏蔽电缆线，采用电缆锁固管挤压橡胶密封套、进而使橡胶密封套同密封外壳与一端电缆线间形成可靠的密封结构，电缆锁固管同密封外壳间采用过盈配合，安装后进行激光焊接，形成激光焊接接缝 1，实现可靠固定；进入密封腔的该端电缆线出口处采用环氧胶密封；电缆线另一端通过密封接头从 2MPa 试验环境介质中引出至试验室自然大气环境中，与测试设备相连接实现信号的采集。

弹性体、密封外壳、电缆锁固管均选用 05Cr17Ni4Cu4Nb 不锈钢材料，弹性体同密封外壳一端采用小过盈配合后，进行激光焊接密封，见环形激光焊接接缝 2；弹性体同密封外壳另一端按照 HB/Z 《O型密封圈及密封结构的设计》中工作介质为 21MPa 的活动密封结构设计要求，设计 O 型密封圈密封结构，包括槽的结构尺寸、表面粗糙度选为 R0.16、选用 O 型密封圈邵氏硬度为 80、弹性体同密封外壳间的径向设计间隙为 0.05，并在弹性体上设计由 20° 的导向圆锥面，保证安装时 O 型密封圈完好而不被损坏。

对惠斯通电桥电路的防护设计如图 5 所示，采用多层组合粘贴密封防护技术，有效防止粘贴密封胶的内聚失效、粘贴失效。该防护设计是在高液压下金属箔式电阻应变计和导线的安装与防护^[4]基础上进行了适应性的改进。首先，在粘贴于应力敏感区的金属箔式电阻应变计（中航电测耐高低温的 BYM 系列金属箔式电阻应变计）表面及四周涂约 1mm 厚的一层耐高低温硅橡胶，并立即抽真空至真空度小于 0.1Pa；待硅橡胶固化后，用 DG-4 环氧胶（A、B 双组份，1:1 配比，耐高低温性、耐水、油、耐压酸碱性、有机溶剂等，粘接性良好）^[5]将双面经钠萘络合物表面处理过的聚四氟乙烯薄膜粘贴于应变感应区的弹性体金属材料表面，使得聚四氟乙烯薄膜将金属箔式电阻应变计上的耐低温硅橡胶四周密封严实，然后再立即抽真空至真空度小于 0.1Pa，以避免 DG-4 环氧胶直接粘贴在金属箔式电阻应变计上；待 DG-4 环氧胶固化后，再在聚四氟乙烯薄膜上及其四周涂一层约 1mm 厚的耐高低温硅橡胶，待其完全固化后，再在硅橡胶表面刷涂一层硅类三防保护漆后，固化即可。

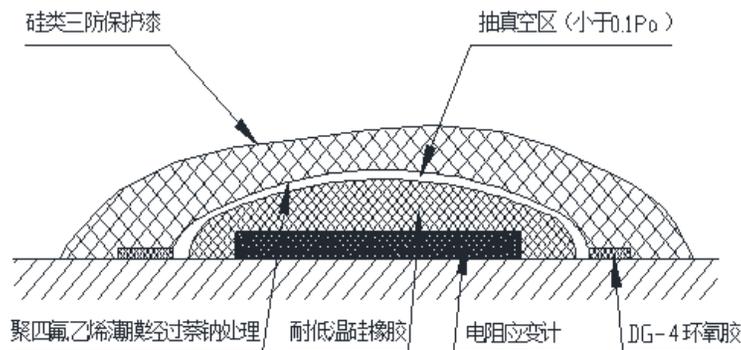


图 5 惠斯通电桥电路的防护设计

以上对惠斯通电桥电路的防护设计经过高温、低温、气压、盐雾、湿热、浸水等试验验证效果良好，其中，用绝缘电阻测试仪在 100VDC 档位测试盐雾、湿热、浸水试验后的绝缘电阻值数据见表 1。试验表明：对惠斯通电桥电路的防护设计有效保证了敏感元件电路在盐雾、湿热环境下的性能。

表 1 盐雾、湿热、浸水试验前后绝缘电阻对比数据

编号	试验前	盐雾试验后	湿热试验后	浸水试验	判定结果
001	60000 MΩ	55000 MΩ	55000 MΩ	55000 MΩ	合格
002	50000 MΩ	50000 MΩ	45000 MΩ	50000 MΩ	合格
003	55000 MΩ	50000 MΩ	50000 MΩ	50000 MΩ	合格

三、性能测试

为检测该轴向力传感器在 2MPa 水压浸泡试验前后的绝缘电阻是否满足要求，以及其直线度、滞后、重复性等性能是否满足 2%F·S 的用户要求，因此在水压浸泡试验前后对该电阻应变式测力传感器进行绝缘电阻测试，参照 JJG391-2009《力传感器检定规程》的规定，在水压浸泡试验后对该电阻应变式测力传感器主要性能进行性能测试。

测试环境条件：室温 15℃ ~ 35℃，相对湿度 (20% ~ 80%)RH，气压 86kpa ~ 106kpa；

测试仪器设备：Agilent34401 数字电压表，10.000VDC 精密直流稳压电源，60kN 静重式标准测力机，水压浸泡试验水压 2MPa，时间 2h。

在充分考虑环境介质压力带来的附加力及摩擦力等的影响，结合工程应用实际安装轴向力传感器进行试验测试时，给轴向力传感器加载 5kN 轴向预压力，以 5kN ~ 35kN 的测试数据为依据进行直线度、滞后、重复性等的计算，计算方法参照 JJG391-2009 力传感器检定规程。

水压浸泡试验前后绝缘电阻测试数据见表 2，水压浸泡试验后性能测试数据见表 3。

表 2 水压浸泡试验前后绝缘电阻测试数据对比

编号	要求值	浸水试验前	浸水试验后	判定结果
002	≥1000 MΩ (100V)	15000 MΩ	15000 MΩ	合格
003	≥1000 MΩ (100V)	20000 MΩ	20000 MΩ	合格

表 3 测力传感器性能测试数据

编号 002 轴向力传感器 (mV)						编号 003 轴向力传感器 (mV)					
载荷	第一次	第二次	第三次	平均值	理论值	载荷	第一次	第二次	第三次	平均值	理论值
5kN	4231	4234	4229	4231	4231	5kN	3168	3146	3132	3149	3149
10kN	5776	5774	5773	5774	5787	10kN	4732	4694	4682	4703	4728
15kN	7313	7314	7308	7312	7343	15kN	6280	6263	6242	6262	6307
20kN	8860	8856	8852	8856	8899	20kN	7848	7829	7817	7831	7886
25kN	10415	10411	10408	10411	10455	25kN	9430	9419	9401	9416	9465
30kN	11982	11977	11972	11977	12011	30kN	11024	11000	10987	11004	11044
35kN	13568	13566	13567	13567	13567	35kN	12640	12622	12607	12623	12623
30kN	12004	12008	12005	12006	12011	30kN	11041	11028	11097	11055	11044
25kN	10442	10445	10444	10444	10455	25kN	9455	9432	9424	9437	9465
20kN	8881	8888	8881	8884	8899	20kN	7846	7836	7826	7836	7886
15kN	7328	7331	7330	7330	7343	15kN	6246	6234	6222	6234	6307
10kN	5744	5750	5746	5747	5787	10kN	4631	4621	4612	4621	4728
5kN	4160	4164	4164	4163	4231	5kN	3084	3076	3069	3076	3149

直线度: $-0.47\%F \cdot S$, 滞后: $-0.73\%F \cdot S$,
 重复性: $0.103\%F \cdot S$, 输出灵敏度: $0.9336mV/V$

直线度: $-0.58\%F \cdot S$, 滞后: $-0.86\%F \cdot S$,
 重复性: $0.73\%F \cdot S$, 输出灵敏度: $0.9474mV/V$

由表 2、表 3 测试数据可知，该涡轮氧泵轴向力传感器水压浸泡试验前后绝缘电阻合格，实测输出灵敏度为 $0.9336mV/V \sim 0.9474mV/V$ 同设计值 $0.9107mV/V$ 基本一致，相应的直线度、滞后、重复性指标能够满足 $2\%F \cdot S$ 的用户要求。

四、结语

本文针对在轴向径向极紧促的空间内、 $2MPa$ 压力的水介质环境中对某涡轮氧泵轴向力的测量要求，简要介绍了一种轴向力传感器的主要结构设计和密封防护设计方法，经测试表明该轴向力传感器输出灵敏度实测值与理论值基本一致，性能满足要求。本文如有不妥之处，欢迎各位同仁探讨指正。

【参考文献】

- [1] 刘九卿. 应变电阻式称重传感器 [M]. 北京: 中国衡器协会, 2006: 6.
- [2] 何著, 赵寿根, 杨嘉陵, 程伟. $0Cr17Ni4Cu4Nb$ 不锈钢动态力学性能研究 [J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(3) 总第 107 期: 418~421.
- [3] 资新运等. 应变式扭矩传感器的分析及 ANSYS 仿真 [J]. 仪表技术, 2014, (10): 50~54.
- [4] 张如一, 沈观林, 李朝弟. 应变电测与传感器 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 132~133.
- [5] 郑瑞琪. 中国航空材料手册 (第 6 卷) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 441~450.