

焊接密封型负荷传感器中膜片的优化设计

霍尼韦尔传感控制中国有限公司 汤建华 梁婵 徐修祝

【摘要】 密封膜片是焊接密封型称重/测力传感器中的重要组件。在设计时，密封膜片除了要保证传感器密封性能，同时还要保证尽量减小膜片本身对传感器性能的影响；故优化设计是其必要环节。本文通过 Pro/Mechanica 软件对杯型密封膜片进行了优化设计。该方法对其它类型膜片的参数优化也具有一定的参考价值。

【关键词】 膜片；Pro/Mechanica；负荷传感器；优化设计

引言

电阻应变式负荷（称重）传感器的使用环境有时非常恶劣。在这类环境中，如果不对传感器进行有效可靠的密封，传感器在短期内就会失效。所以，为了保证传感器在这种环境中能够长期稳定地正常工作，很多公司的产品一般采用金属焊接膜片的全密封方式。这种全密封方法是一种十分有效的解决方案，保证了传感器的工作可靠性和长期稳定性；但是如果密封膜片结构设计的不合理，会直接影响传感器的准确度，所以有必要进行膜片的优化设计。

根据传感器结构的不同，密封膜片相应地也有几种不同结构，如平膜片，波纹平膜片，杯型膜片，金属波纹管等等。但无论对于哪种结构，若采用传统的设计方法，其计算都很繁琐，且精度不高。本文则通过 Pro/Mechanica 软件对杯型密封膜片进行了优化设计。Pro/Mechanica 是 PTC 公司 Pro/Engineer 软件下集成的 CAE 分析软件，具有操作简单、与 CAD 无缝集成等特点。

一、建立分析模型

杯型密封膜片的结构尺寸如图 1 所示，主要结构尺寸为 D ， $D1$ ， $R1$ ， $R2$ ， H 。膜片的厚度为固定值 0.1mm 。尺寸 D 受传感器的弹性体结构设计限制，也认为是固定值。所以膜片的设计变量有 4 个： $D1$ ， $R1$ ， $R2$ ， H （初始值分别为 20mm ， 2mm ， 1mm ， 10mm ）。

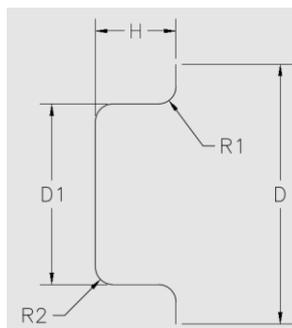


图 1 杯型膜片尺寸图

为了分析杯型膜片结构对传感器性能的影响，我们将膜片和弹性体的装配件导入 Pro/Mechanica 中进行分析。通过分析杯型膜片结构的变化对传感器敏感区应变分布大小的影响来验证并优化膜片

结构。在分析模型中，传感器的额定载荷为 50kg，施加点在弹性体上安装面，施加约束在弹性体下安装面，如图 2 所示。

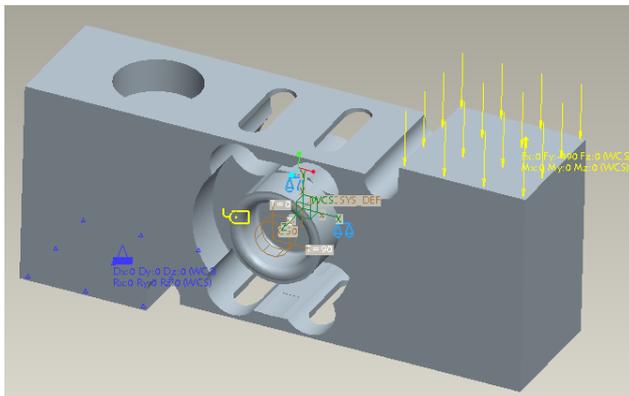


图 2 膜片和弹性体装配件模型

弹性体材料为 0Cr17Ni4Cu4Nb，弹性模量设为 200GPa，泊松比 0.28；膜片材料为 304L，弹性模量和泊松比同弹性体，膜片材料的屈服强度取 210MPa。

弹性体采用默认的四面体单元，膜片采用默认的壳单元进行网格划分。膜片和弹性体采用 Pro/Mechanica 中的 Bond 方式进行连接，忽略了焊接工艺对装配件的影响。

另外，因为传感器是内孔贴片，故以内孔中心轴为基准，建立圆柱坐标系，便于分析贴片区的周向应力分布结果输出。

二、模型的静态分析

作为优化设计的前期工作，需要先对模型进行静态分析，包括弹性体未焊接膜片前的应力分析和弹性体焊接膜片后的应力分析。通过 File 菜单下 New Static 建立相应的静态分析并计算。结果如下：弹性体未焊膜片时，贴片区的周向应力分布如图 3 所示；弹性体焊上膜片后，贴片区的周向应力分布如图 4。

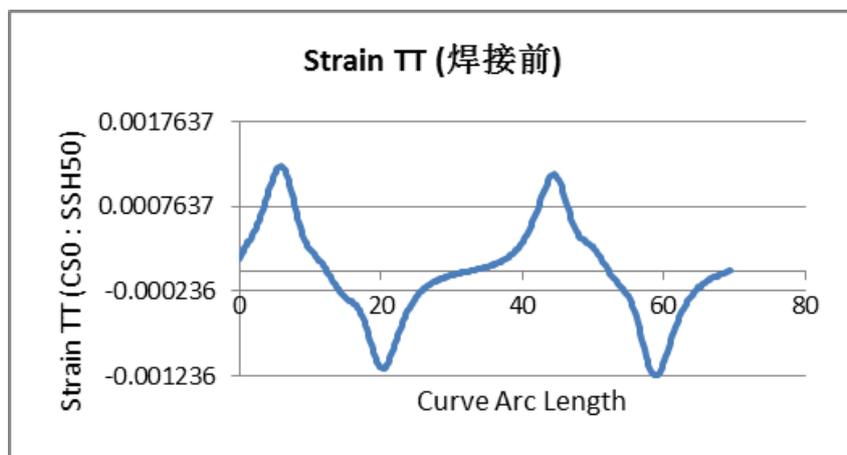


图 3 弹性体未焊接膜片时贴片区周向应力分布

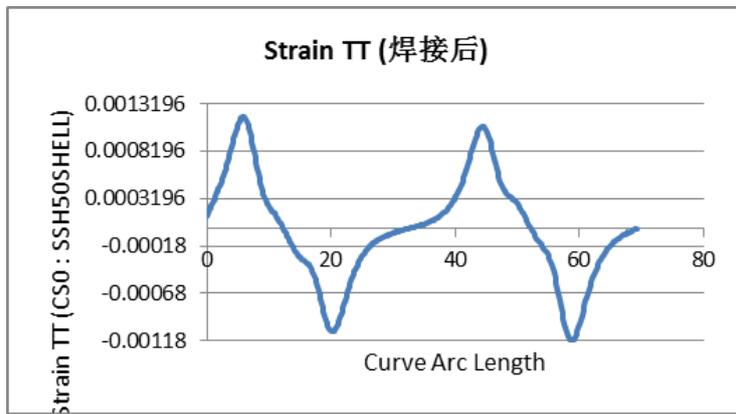


图 4 弹性体焊接膜片后，贴片区周向应力分布

通过比较焊接前后贴片区最大周向应力值（max_strain_TT）（焊接前：1258 微应变，焊接后：1188 微应变）可以发现：在优化膜片尺寸前，焊接膜片后的传感器额定输出预计会比焊接膜片前减小 5.56%。

三、膜片参数的灵敏度分析

通过灵敏度分析可以确定模型中各参数对输出结果影响的大小。在模型以后的优化过程中重点考虑那些对输出结果有显著影响的参数，而忽略那些对输出结果影响较小的参数。这样可以减轻后期优化设计的工作量，提高效率。Pro/Mechanica 在灵敏度分析中提供了局部灵敏度分析（Local Sensitivity Analysis）和全局灵敏度分析（Global Sensitivity Analysis）两种功能：局部灵敏度计算了模型中各参数的微小变化（Pro/Mechanica 默认是变化 1%）对模型输出结果的影响程度；而全局灵敏度需要先确定模型中各参数的变化范围，然后计算各参数在整个变化范围内的改变对输出结果的影响。根据 Pro/Mechanica 对两种灵敏度分析的定义可知，局部灵敏度可以作为对问题的定性分析，而全局灵敏度则更适合应用于问题的定量分析。故我们采用局部灵敏度分析来确认各参数的重要性，并选择贴片区最大周向应力值（max_strain_TT）和膜片的最大等效应力（max_stress_vm）最为观察结果。汇总各参数的计算结果如图 5，图 6 所示。

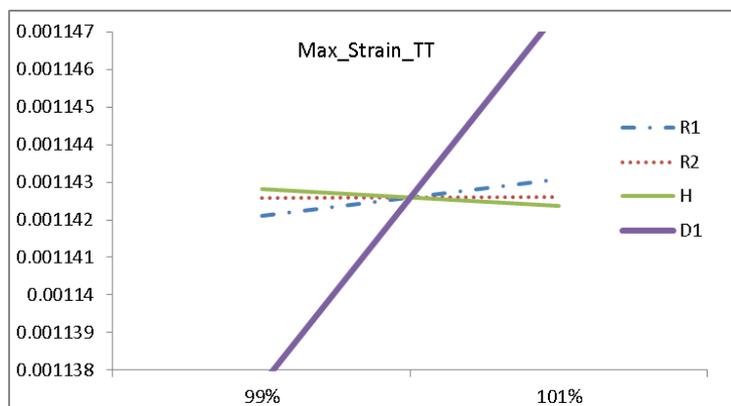


图 5 各参数对贴片区最大周向应力输出的影响

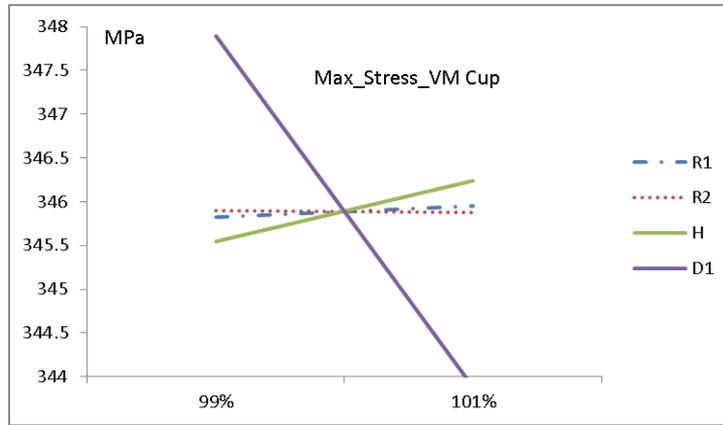


图 6 各参数对膜片最大等效应力 (Von Mises) 输出的影响

根据图 5, 图 6, 可以看出参数 D1 对传感器输出影响最显著, 参数 H 次之, 其余 R1 和 R2 则最不明显。但是, 需要考虑到 R1 和 R2 由于初始值较小, 在做局部灵敏度分析时绝对变化量也较小, 故对输出影响可能不太明显。最终还是选择 4 个参数做优化设计。

四、膜片的优化分析与验证

所谓优化设计是从多种方案中选择最佳方案的设计方法。它以数学中的最优化理论为基础, 以计算为手段, 根据设计所追求的性能目标, 建立目标函数, 在满足给定的各种约束条件下, 寻求最优的设计方案。一般来说, 优化设计包括三个要素: 优化目标, 优化约束和优化参数。在膜片的优化设计中, 这三个要素分别是:

优化目标——贴片区周向的平均应变值最大, 具体设置目标为: max_strain_TT 的最大值;

优化约束——膜片最大等效应力小于膜片材料的许用应力 (考虑到本例的实际情况, 设安全系数 $S=1$), 具体设置为 max_stress_vm_cup < 210MPa;

优化参数——灵敏度分析得到的结果: 4 个变量都需要考虑。另外, 考虑到制造工艺等因素, 各优化参数的范围具体设置为: $(D1)/2 = 6 \sim 10.4\text{mm}$, $R1 = 1 \sim 2.4\text{mm}$, $R2 = 1 \sim 3\text{mm}$, $H = 6 \sim 12\text{mm}$ 。

完成以上参数设置后, 开始进行计算, 最终得到优化后的参数尺寸见图 7:

```

Best Design Found:
Parameters:
  d81          10.1459
  d80           6
  d78           2.4
  d79           1
Goal: 1.2358e-03
  
```

图 7 优化后的参数尺寸

根据优化后膜片尺寸更新模型, 再次进行弹性体焊接膜片后的应力分析, 结果如图 8 所示。

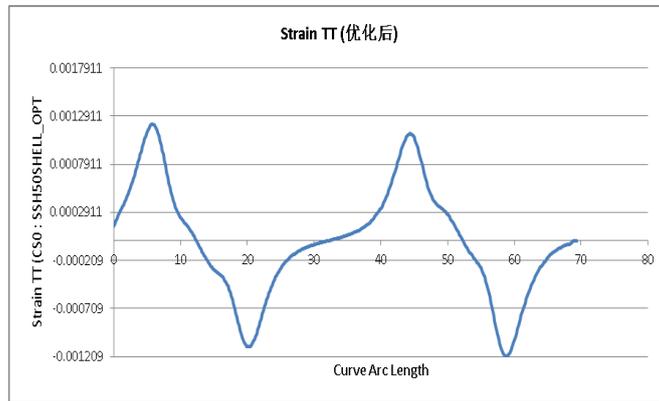


图 8 膜片优化后贴片区周向应力分布

其焊接后 max_strain_TT 值为 1204 微应变，较优化前增加了 1.35%，即预计优化后的膜片在焊接后将会使传感器额定输出值减小 4.29%。

按照优化后的膜片，实测三个样机的额定输出值在焊接前后的测试结果见表 1：

表 1 实测样机焊接前后的额定输出值变化

样机编号	焊接前 Span(mv/V)	焊接后 Span(mv/V)	影响量(%)
1	2.025723	1.928325	4.82
2	2.055369	1.961534	4.56
3	2.073309	1.970722	4.95

可见 CAE 的计算结果和实际样机测试结果还是比较接近的，而且 CAE 的结算结果一般是偏小。

五、结论

通过 Pro/Engineer 的 CAD/CAE 集成平台对杯型膜片进行优化设计，是一种快速有效的优化设计方法，其避免了大量的人工计算与分析工作。该方法对其它类型膜片的参数优化也具有一定的参考指导意义。

参考文献

1. 基于 Pro/Mechanica 环境的机械结构分析及优化设计 计算机应用技术 2007.9 石磊，郝点，吴广宇
2. 机械优化设计 方世杰 机械工业出版社 2003
3. Pro/ENGINEER Wildfire4.0 Help Document, PTC 公司

作者简介

汤建华，1979 年生，男，汉族，江苏昆山人，硕士，高级工程师，主要从事应变式传感器的研发应用与管理工作的。