



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111159948 B

(45) 授权公告日 2022.08.16

(21) 申请号 201911397545.X  
 (22) 申请日 2019.12.30  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 111159948 A  
 (43) 申请公布日 2020.05.15  
 (73) 专利权人 西北工业大学  
 地址 710072 陕西省西安市碑林区友谊西路127号  
 (72) 发明人 周长聪 岳珠峰 李海和 张政 黄晓宇  
 (74) 专利代理机构 北京律智知识产权代理有限公司 11438  
 专利代理师 阚梓瑄  
 (51) Int. Cl.  
 G06F 30/23 (2020.01)  
 G06F 30/17 (2020.01)  
 G06F 111/10 (2020.01)  
 G06F 119/02 (2020.01)

(56) 对比文件  
 CN 109918794 A, 2019.06.21  
 CN 109885965 A, 2019.06.14  
 CN 110276131 A, 2019.09.24  
 CN 104156501 A, 2014.11.19  
 CN 106407620 A, 2017.02.15  
 KR 20100008366 A, 2010.01.25  
 US 2019145462 A1, 2019.05.16  
 沈洞天. 附件机匣传动系统中滚动轴承及齿轮轴的可靠性分析.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 (工程科技 II 辑)》.2013, (第3期), C031-31页.  
 贺东斌 等. 航空关节轴承的可靠性分析.《机械强度》.1995, 第17卷 (第1期), 29-31页.  
 G.L.Sivakumar Babu .etal.Reliability analysis of allowable pressure on shallow foundation using response surface method.《Computers and Geotechnics》.2007, 第34卷 (第3期), 187-194页.

审查员 张琪

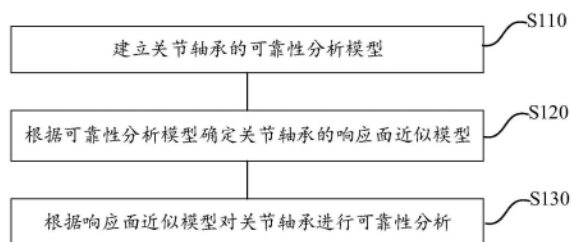
权利要求书1页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法

(57) 摘要

本公开涉及可靠性分析技术领域, 提供了一种考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法, 包括: 建立所述关节轴承的可靠性分析模型; 根据所述可靠性分析模型确定所述关节轴承的响应面近似模型; 根据所述响应面近似模型对所述关节轴承进行可靠性分析。本公开能够对关节轴承进行可靠性分析。



1. 一种考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,包括:  
建立所述关节轴承的可靠性分析模型;  
根据所述可靠性分析模型确定所述关节轴承的响应面近似模型;  
根据所述响应面近似模型对所述关节轴承进行可靠性分析;  
所述关节轴承包括内圈和外圈,所述外圈围绕所述内圈,所述外圈的可靠性分析模型为:

$$g_{out} = \sigma_{b-out} - \sigma_{out}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a);$$

其中,  $g_{out}$  为所述外圈的功能函数值,  $\sigma_{b-out}$  为所述外圈的极限强度,  $\sigma_{out}$  为所述外圈的最大应力,  $E_{out}$  为所述外圈的弹性模量,  $E_{in}$  为所述内圈的弹性模量,  $F_r$  为所述关节轴承受到的径向载荷,  $F_a$  为所述关节轴承受到的轴向载荷。

2. 根据权利要求1所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,所述响应面近似模型为:

$$\bar{g}_{out}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a) = 4.9162 \times 10^{-6} E_{out} - 4.7746 \times 10^{-6} E_{in} - 3.81125 \times 10^{-4} F_r - 3.6063 \times 10^{-4} F_a + 21.31057.$$

3. 根据权利要求1所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,所述关节轴承包括内圈和外圈,所述外圈围绕所述内圈,所述内圈的可靠性分析模型为:

$$g_{in} = \sigma_{b-in} - \sigma_{in}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a);$$

其中,  $g_{in}$  为所述内圈的功能函数值,  $\sigma_{b-in}$  为所述内圈的极限强度,  $\sigma_{in}$  为所述内圈的最大应力,  $E_{out}$  为所述外圈的弹性模量,  $E_{in}$  为所述内圈的弹性模量,  $F_r$  为所述关节轴承受到的径向载荷,  $F_a$  为所述关节轴承受到的轴向载荷。

4. 根据权利要求3所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,所述响应面近似模型为:

$$\bar{g}_{in}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a) = -6.4577 \times 10^{-6} E_{out} + 7.4094 \times 10^{-6} E_{in} - 1.3502 \times 10^{-4} F_r - 7.8664 \times 10^{-4} F_a + 13.9527.$$

5. 根据权利要求1-4任一项所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,所述  $E_{out}$ 、所述  $E_{in}$ 、所述  $F_r$  以及所述  $F_a$  均服从正态分布。

6. 根据权利要求1所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,所述  $\sigma_{b-out}$  为1960MPa。

7. 根据权利要求3所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,所述  $\sigma_{b-in}$  为1340MPa。

8. 根据权利要求1所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,建立所述关节轴承的可靠性分析模型包括:

建立所述关节轴承的有限元模型;

根据所述有限元模型建立所述关节轴承的可靠性分析模型。

9. 根据权利要求1所述的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,其特征在于,所述可靠性分析模型是隐式极限状态函数,所述响应面近似模型为显式极限状态函数。

## 考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法

### 技术领域

[0001] 本公开涉及可靠性分析技术领域,尤其涉及一种考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法。

### 背景技术

[0002] 作为滑动轴承,关节轴承具有转动灵活、结构紧凑、易于装拆等特点,能够满足重载荷和长寿命要求,已广泛应用于矿山、冶金、电力、交通、航空航天和纺织等各类机械设备。

[0003] 关节轴承主要是由一个有外球面的内圈和一个有内球面的外圈组成,能承受较大的负荷,根据其不同的类型和结构,可以承受径向载荷、轴向载荷或径向、轴向同时存在的联合载荷。在这些载荷的作用下,关节轴承容易失效。然而,现有技术中缺少对关节轴承进行可靠性分析的方法。

[0004] 需要说明的是,在上述背景技术部分公开的信息仅用于加强对本公开的背景的理解,因此可以包括不构成对本领域普通技术人员已知的现有技术的信息。

### 发明内容

[0005] 本公开的目的在于提供一种考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,能够对关节轴承进行可靠性分析。

[0006] 根据本公开的一个方面,提供一种考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,包括:

[0007] 建立所述关节轴承的可靠性分析模型;

[0008] 根据所述可靠性分析模型确定所述关节轴承的响应面近似模型;

[0009] 根据所述响应面近似模型对所述关节轴承进行可靠性分析。

[0010] 在本公开的一种示例性实施例中,所述关节轴承包括内圈和外圈,所述外圈围绕所述内圈,所述外圈的可靠性分析模型为:

[0011]  $g_{out} = \sigma_{b-out} - \sigma_{out}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a)$ ;

[0012] 其中, $g_{out}$ 为所述外圈的功能函数值, $\sigma_{b-out}$ 为所述外圈的极限强度, $\sigma_{out}$ 为所述外圈的最大应力, $E_{out}$ 为所述外圈的弹性模量, $E_{in}$ 为所述内圈的弹性模量, $F_r$ 为所述关节轴承受到的径向载荷, $F_a$ 为所述关节轴承受到的轴向载荷。

[0013] 在本公开的一种示例性实施例中,所述响应面近似模型为:

[0014] 
$$\bar{g}_{out}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a) = 4.9162 \times 10^{-6} E_{out} - 4.7746 \times 10^{-6} E_{in} - 3.81125 \times 10^{-4} F_r - 3.6063 \times 10^{-4} F_a + 21.31057$$

[0015] 在本公开的一种示例性实施例中,所述关节轴承包括内圈和外圈,所述外圈围绕所述内圈,所述内圈的可靠性分析模型为:

[0016]  $g_{in} = \sigma_{b-in} - \sigma_{in}(E_{out}, E_h, F_r, F_a)$ ;

[0017] 其中, $g_{in}$ 为所述内圈的功能函数值, $\sigma_{b-in}$ 为所述内圈的极限强度, $\sigma_{in}$ 为所述内圈的

最大应力,  $E_{out}$  为所述外圈的弹性模量,  $E_{in}$  为所述内圈的弹性模量,  $F_r$  为所述关节轴承受到的径向载荷,  $F_a$  为所述关节轴承受到的轴向载荷。

[0018] 在本公开的一种示例性实施例中, 所述响应面近似模型为:

$$[0019] \quad \bar{g}_{in}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a) = -6.4577 \times 10^{-6} E_{out} + 7.4094 \times 10^{-6} E_{in} - 1.3502 \times 10^{-4} F_r - 7.8664 \times 10^{-4} F_a + 13.9527。$$

[0020] 在本公开的一种示例性实施例中, 所述  $E_{out}$ 、所述  $E_{in}$ 、所述  $F_r$  以及所述  $F_a$  均服从正态分布。

[0021] 在本公开的一种示例性实施例中, 所述  $\sigma_{b-out}$  为 1960MPa。

[0022] 在本公开的一种示例性实施例中, 所述  $\sigma_{b-in}$  为 1340MPa。

[0023] 在本公开的一种示例性实施例中, 建立所述关节轴承的可靠性分析模型包括:

[0024] 建立所述关节轴承的有限元模型;

[0025] 根据所述有限元模型建立所述关节轴承的可靠性分析模型。

[0026] 在本公开的一种示例性实施例中, 所述可靠性分析模型是隐式极限状态函数, 所述响应面近似模型为显式极限状态函数。

[0027] 本公开的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法, 通过建立关节轴承的可靠性分析模型, 并根据可靠性分析模型确定响应面近似模型, 从而可以利用响应面近似模型对关节轴承进行可靠性分析; 同时, 由于响应面近似模型为显式表示, 从而解决了由于现有的可靠性分析模型是隐式表示所导致的可靠性分析难以进行的问题。

[0028] 应当理解的是, 以上的一般描述和后文的细节描述仅是示例性和解释性的, 并不能限制本公开。

## 附图说明

[0029] 通过参照附图来详细描述其示例性实施例, 本公开的上述和其它特征及优点将变得更加明显。显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本公开的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0030] 图1为本公开实施方式的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法的流程图;

[0031] 图2为本公开实施方式中响应量的频数直方图。

## 具体实施方式

[0032] 现在将参考附图更全面地描述示例实施方式。然而, 示例实施方式能够以多种形式实施, 且不应被理解为限于在此阐述的范例; 相反, 提供这些实施例使得本公开将全面和完整, 并将示例实施例的构思全面地传达给本领域的技术人员。所描述的特征、结构或特性可以以任何合适的方式结合在一个或更多实施方式中。在下面的描述中, 提供许多具体细节从而给出对本公开的实施方式的充分理解。然而, 本领域技术人员将意识到, 可以实践本公开的技术方案而没有所述特定细节中的一个或更多, 或者可以采用其它的方法、材料、装置等。在其它情况下, 不详细示出或描述公知技术方案以避免模糊本公开的各方面。

[0033] 此外, 附图仅为本公开的示意性图解, 并非一定是按比例绘制。图中相同的附图标

记表示相同或类似的部分,因而将省略对它们的重复描述。用语“一”和“该”用以表示存在一个或多个要素/组成部分/等;用语“包括”和“具有”用以表示开放式的包括在内的意思并且是指除了列出的要素/组成部分/等之外还可存在另外的要素/组成部分/等。

[0034] 相关技术中,关节轴承一般用于速度较低的摆动运动(即角运动),由于滑动表面为球面形,亦可在一定角度范围内作倾斜运动(即调心运动),在支承轴与轴壳孔不同心度较大时,仍能正常工作。关节轴承按其主要受力形式可分为向心关节轴承、角接触关节轴承和推力关节轴承。由于关节轴承具有大的摆动角和调心性能,能够实现旋转、摆动和调心,且结构简洁,有助于提高结构件的灵活性,故被广泛地用于航空航天机械中。机构可靠性对于保障结构机构产品的安全十分重要,它是在电子元器件可靠性基础上发展起来的,相对于电子元器件的可靠性,结构机构可靠性的发展较为落后。这主要表现为两个方面,其一是结构机构可靠性分析所需要的数据较为缺乏,这是由于结构机构的标准化程度较低;其二是结构机构的可靠性分析与设计理论方法的发展较为落后,尤其是针对复杂结构机构系统的可靠性分析与设计问题。同时,在工程实际问题中,参数的不确定性广泛存在,因此对工程实际问题中输入参数的不确定性到模型输出响应不确定性的传递的过程的分析是十分必要的。

[0035] 对于关节轴承结构,目前很难采用解析的方法去求解,只能借助有限元软件进行分析,由于此时的极限状态方程是隐式表示的,传统的可靠性分析方法遇到了难以克服的困难。

[0036] 本公开实施方式提供一种考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法。如图1所示,该考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法可以包括步骤S110至步骤S130,其中:

[0037] 步骤S110、建立关节轴承的可靠性分析模型。

[0038] 步骤S120、根据可靠性分析模型确定关节轴承的响应面近似模型。

[0039] 步骤S130、根据响应面近似模型对关节轴承进行可靠性分析。

[0040] 本公开实施方式的考虑随机不确定性的关节轴承的可靠性分析方法,通过建立关节轴承的可靠性分析模型,并根据可靠性分析模型确定响应面近似模型,从而可以利用响应面近似模型对关节轴承进行可靠性分析;同时,由于响应面近似模型为显式表示,从而解决了由于现有的可靠性分析模型是隐式表示所导致的可靠性分析难以进行的问题。

[0041] 下面对本公开实施方式的各步骤进行详细说明:

[0042] 在步骤S110中,建立关节轴承的可靠性分析模型。

[0043] 该关节轴承包括内圈和外圈,该外圈围绕内圈,该外圈的可靠性分析模型为:

$$[0044] \quad g_{\text{out}} = \sigma_{\text{b-out}} - \sigma_{\text{out}}(E_{\text{out}}, E_{\text{in}}, F_{\text{r}}, F_{\text{a}}),$$

[0045] 其中, $g_{\text{out}}$ 为外圈的功能函数值, $\sigma_{\text{b-out}}$ 为外圈的极限强度, $\sigma_{\text{out}}$ 为所述外圈的最大应力, $E_{\text{out}}$ 为外圈的弹性模量, $E_{\text{in}}$ 为内圈的弹性模量, $F_{\text{r}}$ 为关节轴承受到的径向载荷, $F_{\text{a}}$ 为关节轴承受到的轴向载荷。 $E_{\text{out}}, E_{\text{in}}, F_{\text{r}}, F_{\text{a}}$ 均服从正态分布。其中, $E_{\text{out}}, E_{\text{in}}, F_{\text{r}}, F_{\text{a}}$ 的分布参数如表1所示:

[0046] 表1

变量 $x$	均值 $\mu_x$	标准差 $\sigma_x$	变异系数 $V_x$	分布形式
外圈弹性模量 $E_{out}/GPa$	200	10	0.05	正态分布
内圈弹性模量 $E_{in}/GPa$	206	10.3	0.05	正态分布
径向载荷 $F_r/kN$	40	4	0.1	正态分布
轴向载荷 $F_a/kN$	10	1	0.1	正态分布

[0048] 此外,该内圈的可靠性分析模型可以为:

$$[0049] \quad g_{in} = \sigma_{b-in} - \sigma_{in}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a);$$

[0050] 其中, $g_{in}$ 为内圈的功能函数值, $\sigma_{b-in}$ 为内圈的极限强度, $\sigma_{in}$ 为内圈的最大应力。该可靠性分析模型 $g_{out}$ 和 $g_{in}$ 是隐式极限状态函数。

[0051] 上述可靠性分析模型中 $\sigma_{out}$ 和 $\sigma_{in}$ 均为由 $E_{out}, E_{in}, F_r, F_a$ 所表示的隐函数。假设输入变量 $E_{out}, E_{in}, F_r, F_a$ 为 $x = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ ,则 $g_{out}$ 可以表示为 $g_{out}(x)$ ,  $g_{in}$ 可以表示为 $g_{in}(x)$ 。

[0052] 举例而言,建立关节轴承的可靠性分析模型包括:建立关节轴承的有限元模型;根据有限元模型建立关节轴承的可靠性分析模型。其中上述的 $\sigma_{out}$ 和 $\sigma_{in}$ 可以通过有限元模型确定。

[0053] 在步骤S120中,根据可靠性分析模型确定关节轴承的响应面近似模型。

[0054] 该响应面近似模型为显式极限状态函数。以可靠性分析模型等于 $g_{out}(x)$ 为例,该响应面近似模型可以为:

$$[0055] \quad \bar{g}_{out}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i;$$

[0056] 其中,该响应面近似模型包括 $n+1$ 个待定系数 $b = \{b_0, b_1, \dots, b_n\}^T$ ,该待定系数 $b$ 可以通过抽取 $m(m \geq n+1)$ 个样本点 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\} / (i=1, 2, \dots, m)$ ,并运用如下所示的最小二乘法求解待定系数 $b$ :

$$[0057] \quad b = (a^T a)^{-1} a^T y;$$

[0058] 其中, $y = \{g_{out}(x_1), g_{out}(x_2), \dots, g_{out}(x_m)\}^T$ 为样本点对应的响应量列阵,

$$a = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \text{为由} m \text{个样本点构成的} m \times (n+1) \text{阶回归系数矩阵。}$$

[0059] 此外,本公开可以采用加权回归的统计思想来求解向量 $b$ 。通过赋给 $|g_{out}(x_i)|$ 较小的实验样本点 $x_i$ 在回归分析中较大的权数 $w_i$ ,可使 $|g_{out}(x_i)|$ 较小的点在确定 $\bar{g}_{out}(x)$ 时起更重要的作用,从而使得 $\bar{g}_{out}(x)$ 能更好地近似 $g_{out}(x)$ 。

[0060] 若以 $w_i (i=1, \dots, m)$ 表示每个样本点的权数,则 $W = \begin{bmatrix} w_1 & & \\ & \ddots & \\ & & w_m \end{bmatrix}$ 表示的 $m$ 个样本点的

权数构成的 $m \times m$ 阶对角阵称为权重矩阵,考虑每个样本点在回归分析中的权数后,就可以求得待定系数向量 $b$ 的加权最小二乘法计算公式如下:

[0061]  $b = (a^T W a)^{-1} a^T W y;$

[0062] 为了更好地近似  $g_{out}(x)$ , 在拟合响应面时, 希望  $|g_{out}(x_i)|$  越小的样本点  $x_i$  起越重要的作用, 可以如下公式构造每个样本点的权数以及相应的权重矩阵:

$$[0063] \begin{cases} g_{best} = \min_{i=1}^m |g(x_i)| \\ w_i = \frac{g_{best}}{|g(x_i)|} \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ W = \text{diag}(w_i) \end{cases}$$

[0064] 其中  $\text{diag}(\cdot)$  表示矩阵的对角元素。与指数型权数相比, 上式给出的权数很少造成回归矩阵的病态。

[0065] 在本公开其它实施方式中, 根据可靠性分析模型确定关节轴承的响应面近似模型包括:

[0066] 步骤S1201、选用线性的响应面函数  $\bar{g}_{out}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i$  来近似  $g_{out}(x)$ 。

[0067] 步骤S1202、用Bucher设计选取样本点, 即围绕

$x_1^{*(k)} = \{x_{11}^{*(k)}, x_{12}^{*(k)}, \dots, x_{1n}^{*(k)}\}$ , 选取样本点如下:

[0068] 第一次迭代, 将抽样中心点选为均值点, 即  $x_1^{*(1)} = \mu_x = \{\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}\}$ , 其它  $2n$  个点如下所示:

[0069]  $x_i^{*(k)} = \{x_{11}^{*(k)}, \dots, x_{1(i-1)}^{*(k)} + f\sigma_{x_{i-1}}, \dots, x_{1n}^{*(k)}\} (i=2, 3, \dots, n+1);$

[0070]  $x_j^{*(k)} = \{x_{11}^{*(k)}, \dots, x_{1(j-n-1)}^{*(k)} - f\sigma_{x_{j-n-1}}, \dots, x_{1n}^{*(k)}\} (j=n+2, n+3, \dots, 2n+1);$

[0071] 其中  $\mu_{x_i}$  和  $\sigma_{x_i}$  分别为第  $i$  个基本变量  $x_i$  的均值和标准差,  $\mu_x = \{\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}\}$  为均值向量,  $N$  为插值系数, 上标  $(k)$  表示响应面法的第  $k$  次迭代。

[0072] 步骤S1203、若  $k=1$ , 可以执行此步, 即比较  $|g_{out}(x_i^{*(1)})|$  与  $|g_{out}(x_j^{*(1)})|$  的大小, 其中  $i=2, 3, \dots, n+1, j=n+2, n+3, \dots, 2n+1$ 。舍弃其中绝对值大的样本点, 保留绝对值小的点, 可以得到  $n+1$  个样本点, 并根据上述的第一关系式构造样本点的权重矩阵  $W$ 。

[0073] 步骤S1204、由选定的样本点  $x_i^{*(k)}$ , 运用第一关系式求得第  $k$  次迭代的待定系数矩阵和响应面函数  $\bar{g}_{out}^{(k)}$ 。

[0074] 步骤S1205、由AFOSM法求得  $\bar{g}_{out}^{(k)}$  的设计点  $x_D^{(k)} = \{x_{D1}^{(k)}, x_{D2}^{(k)}, \dots, x_{Dn}^{(k)}\}$  和可靠度指标  $\beta^{(k)}$ 。

[0075] 步骤S1206、用样本点  $(\mu_x, g_{out}(\mu_x))$  及  $(x_D^{(k)}, g_{out}(x_D^{(k)}))$  进行线性插值, 求得使  $g_{out}(x_1^{*(k+1)}) \approx 0$  的下次迭代的抽样中心  $x_1^{*(k+1)}$ ,  $x_1^{*(k+1)}$  点的第  $i$  个坐标  $x_{1i}^{*(k+1)}$  可如下计算:

$$[0076] \quad x_{1i}^{*(k+1)} = \mu_{x_i} + (x_{Di}^{(k)} - \mu_{x_i}) \frac{g_{out}(\mu_x)}{g_{out}(\mu_x) - g_{out}(x_D^{(k)})}$$

[0077] 步骤S1207、反复执行步骤S1204、步骤S1205以及步骤S1206,直到前后两次算得的可靠度指标  $|\beta^{(k)} - \beta^{(k-1)}| < \xi$ ,  $\xi$ 是预先给定的精度标准。可知,采用响应面法,并结合先进的有限元软件,则可以通过少量的计算求得能够在概率上收敛于真实的隐式极限状态函数的显式表达式,进而可以采用传统的可靠性分析方法对其进行可靠性分析。

[0078] 经过计算,上述关节轴承的响应面近似模型可以为:

$$[0079] \quad \bar{g}_{out}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a) = 4.9162 \times 10^{-6} E_{out} - 4.7746 \times 10^{-6} E_{in} - 3.81125 \times 10^{-4} F_r - 3.6063 \times 10^{-4} F_a + 21.31057。$$

[0080] 以可靠性分析模型等于  $g_{in}(x)$  为例,采用同样的方法可以确定响应面近似模型为:

$$[0081] \quad \bar{g}_{in}(E_{out}, E_{in}, F_r, F_a) = -6.4577 \times 10^{-6} E_{out} + 7.4094 \times 10^{-6} E_{in} - 1.3502 \times 10^{-4} F_r - 7.8664 \times 10^{-4} F_a + 13.9527。$$

[0082] 由于关节轴承结构包括内圈失效和外圈失效两种失效模式,则可以将关节轴承的响应面近似模型写成  $\bar{g} = \min\{\bar{g}_{out}, \bar{g}_{in}\}$ 。

[0083] 响应面近似模型的验证

[0084] 本公开采用MCS、LS、SubSet\_MCMC以及SubSet\_IS四种可靠性分析方法确定关节轴承的失效概率,结果如表2所示:

[0085] 表2

方法	MCS	LS	SubSet_MCMC	SubSet_IS
投点数	$10^7$	100	10000	10000
失效概率	0.18323	0.18094	0.18673	0.18369
误差(%)	—	1.25	1.91	0.25

[0087] 由表2可知,关节轴承的失效概率为0.183左右。

[0088] 以功能函数值作为响应量,通过本公开的响应面近似模型,用蒙特卡洛法计算出的响应量的各阶统计矩(一至四阶)如表3所示:

[0089] 表3响应量的各阶统计矩

	关节轴承结构
均值	0.88233
标准差	0.9904
偏度	-0.088825
峰度	3.141

[0091] 该响应量的频数直方图如图2所示,由响应量的各阶统计矩得出:均值为0.88233,符合直方图所示情况;标准差为0.9904,符合直方图所示情况;偏度值为-0.088825,其绝对值很小,应为对称分布,与直方图中所示情况十分符合;峰度为3.141,这与正态分布情况下的峰度值(为3)十分接近。由此可知,采用本公开的响应面近似模型进行可靠性分析是切实可行的。

[0092] 本领域技术人员在考虑说明书及实践后,将容易想到本公开的其它实施方案。本



申请旨在涵盖本公开的任何变型、用途或者适应性变化,这些变型、用途或者适应性变化遵循本公开的一般性原理并包括本技术领域中的公知常识或惯用技术手段。说明书和实施例仅被视为示例性的,本公开的真正范围和精神由所附的权利要求指出。

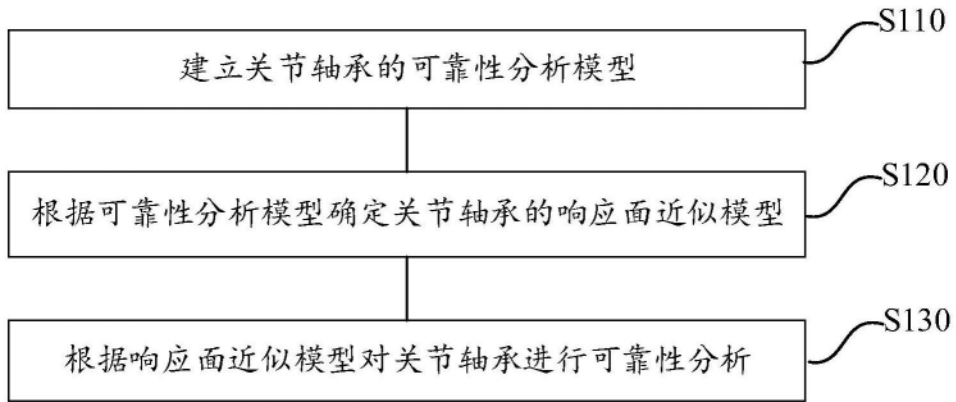


图1

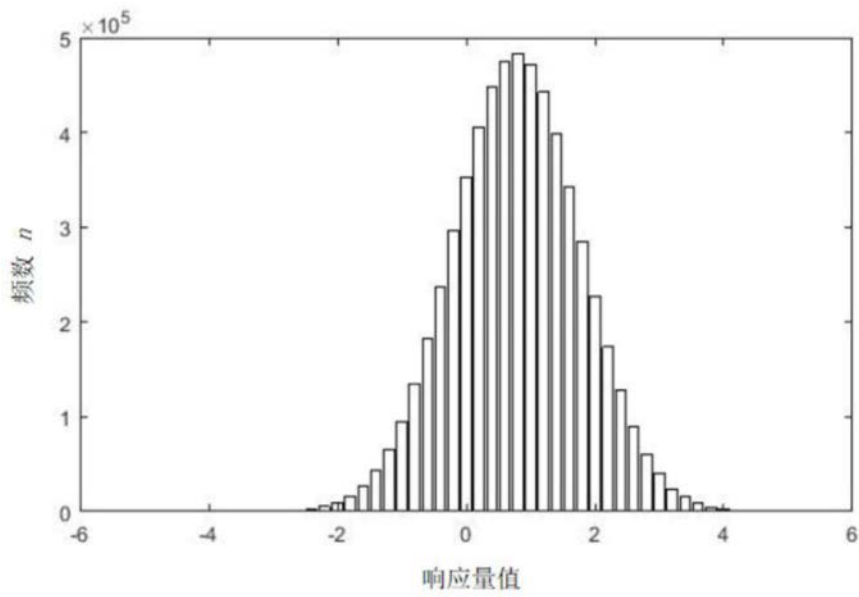


图2