



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103617364 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 05

(21) 申请号 201310651774. 6

(22) 申请日 2013. 12. 04

(71) 申请人 南京工业大学

地址 210009 江苏省南京市新模范马路 5 号

申请人 南京工大数控科技有限公司

(72) 发明人 黄筱调 封杨 陈捷 王华

洪荣晶

(74) 专利代理机构 南京天华专利代理有限责任

公司 32218

代理人 徐冬涛 蒋真

(51) Int. Cl.

G06F 19/00(2011. 01)

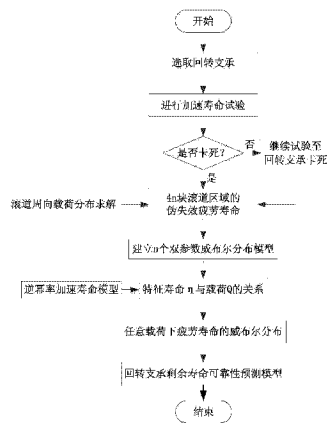
权利要求书2页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种大型回转支承剩余使用寿命的预测方法,包括如下步骤:基于威布尔寿命分布理论推导出回转支承的剩余寿命预测模型,利用试验台对回转支承施以特定载荷,持续运转至回转支承失效,根据回转支承滚道载荷分布特性将滚道分成 4n 段,测量每段回转支承滚道的体积磨损量,再利用 Archard 磨损理论和逆幂率寿命模型建立起回转支承的载荷——疲劳寿命分布——剩余寿命预测模型。本发明的一种大型回转支承剩余使用寿命预测方法只需对一个回转支承进行全寿命疲劳寿命试验,即可实现同类产品的剩余寿命预测,能够为企业节省大量资源,提高产品利用率,并且降低发生事故的风险。



1. 一种基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法,其特征是包括以下步骤:

1) 根据威布尔寿命分布理论  $R = \exp[-(t/\eta)^\beta]$ , 推导出基于可靠性的回转支承的剩余寿命预测模型  $x = \eta \left\{ \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta - \ln[R] \right\}^{\frac{1}{\beta}} - t$ ,  $R$  是可靠度,  $t$  是回转支承已经运转的圈数,  $\beta$ 、 $\eta$  分别是需要本发明的预测方法来确定对应威布尔分布斜率和回转支承的特征寿命,  $x$  为剩余寿命;

2) 根据赫兹接触理论和 ISO281 方法求解出回转支承滚道的载荷分布。设回转支承受到的外载荷分别是: 轴向力  $F_a$ 、径向力  $F_r$  和倾覆力矩  $M$ , 对于某一滚珠, 设其与滚道四点接触的接触力分别为  $Q_{1x}$ ,  $Q_{1y}$ ,  $Q_{2x}$  和  $Q_{2y}$ , 由于回转支承在实际工况中除了沿轴向的旋转外其他自由度都被约束, 因此每个滚珠对滚道的合力应该与外载荷达到平衡, 由此可得:

$$F_r + \sum_{i=1}^Z \varphi_1(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

$$F_a + \sum_{i=1}^Z \varphi_2(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

$$M + \sum_{i=1}^Z \varphi_3(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

其中,  $Z$  是滚珠的数量,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  和  $\varphi_3$  分别是所有滚珠在轴向力  $F_a$ 、径向力  $F_r$  和倾覆力矩  $M$  方向上的合力的表达式。由此, 便可以解得整个滚道沿滚珠的载荷分布情况。然后根据载荷的大小将回转支承划分成  $n$  组, 根据分布的对称性, 则每组有 4 段滚道, 共计  $4n$  段回转支承滚道;

3) 选取某回转支承, 给其施以 100% 极限设计载荷, 利用试验台试验至回转支承因滚道严重失效造成试验机卡死;

4) 记录下回转支承卡死时运转过的圈数  $t_f$ , 将被试回转支承取下试验台并拆解。按照步骤 2) 中方法将回转支承定圈切割成  $4n$  段, 测量每段回转支承滚道的体积磨损量  $W_i$ , 其中最大的体积磨损量为  $W_{\max}$ ;

5) 根据公式  $t_i = \frac{t_f W_{\max}}{W_i}$  分别计算出各段回转支承滚道的伪失效疲劳寿命,  $t_i$  表示各段回转支承滚道的伪疲劳失效寿命。

6) 将步骤 5) 中求得的  $4n$  回转支承的伪失效疲劳寿命按照 2) 中的方法分为  $n$  组, 每组 4 个样本, 求解出  $n$  个应力水平下的回转支承寿命威布尔分布函数  $R_m(t) = \exp[-(t/\eta_m)^{\beta_m}]$  ( $m=1,2,3,\dots,n$ ) 中的  $n$  个  $\beta$  和  $\eta$  的值。

7) 根据公式  $\ln \eta = a + b \ln Q$ , 利用步骤 2) 中求解的对应的载荷值  $Q_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots, n$ ) 和 6) 中求解的  $\eta_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots, n$ ) 和拟合出常数  $a, b$  的值, 从而建立起回转支承特征寿命  $\eta$  与回转支承滚道中所承受的最大载荷  $Q$  的关系模型;

8) 对于选取的回转支承, 由步骤 2) 可求得特定工况下的最大滚道载荷  $Q$ , 由步骤 6) 可

知其疲劳寿命威布尔分布斜率  $\beta_{mean} = \frac{\sum_{m=1}^n \beta_m}{n}$ , 由步骤 7) 可知其特征寿命  $\eta_r$ , 于是便建立起

其剩余疲劳寿命的可靠性预测模型:  $x = \eta \left\{ \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta_{mean}} - \ln[R(x)] \right\}^{\frac{1}{\beta_{mean}}} - t$ ,  $\beta$  为威布尔分布的斜率,  $R$  为可靠度,  $\eta$  为特征寿命,  $x$  为剩余寿命。

2. 根据权利要求 1 所述的基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法, 其特征是所述步骤 1) 中  $n$  的取值为  $n \geq 4$ 。

## 基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法

### 技术领域：

[0001] 本发明涉及一种轴承寿命预测方法，具体涉及一种基于小样本试验的大型回转支承剩余寿命预测方法。

### 背景技术：

[0002] 大型回转支承作为风机、工程机械上的大型回转连接件，通常会承受极大的轴向力、径向力和倾覆力矩。大型回转支承的失效卡死通常会导致设备的停机，严重时可能产生灾难性的后果，如果能够准确地预测其剩余使用寿命，就能够指导操作人员及时维护或更换回转支承，既避免了不必要的维护工作，又能减少重大事故的发生。因此，回转支承剩余寿命的准确预测很有必要。

[0003] 广为使用的寿命预测方法通常有两类：基于数据驱动的方法和基于可靠性的方法。基于数据驱动的寿命预测方法通常从先前获取的振动信号中提取特征，然后根据信号特征的变化趋势建立起设备的寿命衰退模型，最后将在线监测的信号代入之前建立的寿命衰退模型进行寿命预测。然而，回转支承通常使用在港口机械、风机、工程机械中，工况恶劣，转速低至 0.1-10rpm，因此监测所得振动信号的信噪比很低，常用的振动信号特征提取方法几乎不能从中获取到有效信息。

[0004] 为此，很多学者对国际标准 ISO281 中的轴承疲劳寿命计算方法(式 1) 进行研究，提出了很多针对中小型轴承的寿命试验方法和寿命预测模型。然而，大型回转支承比常见的中小型轴承大得多，其滚道的载荷分布形式以及失效方式都不相同，常用的寿命预测方法显然不能直接使用在回转支承上。

$$[0005] \quad L_{10} = a_1 a_2 a_3 \left( \frac{C_a}{P_a} \right)^3 \quad (1)$$

[0006] 上式中， $a_1$  是可靠性系数， $a_2$  是材料系数， $a_3$  是工况系数， $C_a$  是额定动载荷， $P_a$  是当量动载荷， $L_{10}$  是可靠度为 90% 时轴承的疲劳寿命，通常以轴承转过的圈数来表示。

[0007] 此外，现有的疲劳寿命试验方法大多是在不同工况下对批量的轴承进行疲劳试验，以获得轴承的疲劳寿命分布。大型回转支承直径通常在 800-5000mm，无论是利用试验台，还是利用现场安装回转支承的设备，批量的疲劳寿命试验从时间上和费用上都是不可接受的。

[0008] 本发明针对大型回转支承提出了一个基于小样本试验的剩余寿命预测模型，可以根据实际工况，对任意载荷的回转支承进行剩余寿命预测。根据威布尔分布推导出剩余寿命预测模型；基于 Hertz 理论对回转支承滚道进行受力分析，得到滚道的载荷分布；根据 Archard 理论，提出小样本加速寿命试验方法，建立起不同载荷下滚道疲劳寿命的威布尔分布，并由逆幂率加速寿命模型得到回转支承的载荷-寿命曲线，从而完成了回转支承剩余寿命预测模型的建立。目前国内尚未发现类似的回转支承剩余寿命预测方法。

### 发明内容：

[0009] 本发明的目的在于提供一种基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法，本方法以轴承疲劳寿命遵循的威布尔分布为基础，推导出回转支承剩余寿命的预测模型；结合 Archard 磨损理论和逆幂率加速寿命模型给出了基于小样本的疲劳寿命试验方法；并提出了通过处理试验数据得到回转支承剩余寿命模型参数的方法。

[0010] 本发明的技术方案如下：

[0011] 本发明的一种基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法，只需要对一个大型回转支承做全寿命的疲劳试验，即可拟合出同类回转支承的剩余寿命预测模型，供实际使用中实时地预测回转支承的剩余使用寿命。

[0012] 本发明的一种基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法，根据载荷的大小和分布的对称性将回转支承划分成  $n$  组，每组 4 段，共计  $4n$  段回转支承滚道，通过测试全寿命试验后产生的磨损量建立起回转支承滚道载荷——滚道磨损量——回转支承寿命模型。

[0013] 一种基于小样本的大型回转支承剩余使用寿命预测方法，包括以下步骤：

[0014] 1) 根据威布尔寿命分布理论  $R = \exp[-(t/\eta)^\beta]$ ，推导出基于可靠性的回转支承

的剩余寿命预测模型  $x = \eta \left\{ \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta - \ln[R] \right\}^{\frac{1}{\beta}} - t$ ， $R$  是可靠度， $t$  是回转支承已经运转的圈

数， $\beta$ 、 $\eta$  分别是需要本发明的预测方法来确定对应威布尔分布斜率和回转支承的特征寿命， $x$  为剩余寿命；

[0015] 2) 根据赫兹接触理论和 ISO281 方法求解出回转支承滚道的载荷分布。设回转支承受到的外载荷分别是：轴向力  $F_a$ 、径向力  $F_r$  和倾覆力矩  $M$ ，对于某一滚珠，设其与滚道四点接触的接触力分别为  $Q_{1x}$ 、 $Q_{1y}$ 、 $Q_{2x}$  和  $Q_{2y}$ ，由于回转支承在实际工况中除了沿轴向的旋转外其他自由度都被约束，因此每个滚珠对滚道的合力应该与外载荷达到平衡，由此可得：

[0016]

$$F_r + \sum_{i=1}^Z \varphi_1(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

[0017]

$$F_a + \sum_{i=1}^Z \varphi_2(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

[0018]

$$M + \sum_{i=1}^Z \varphi_3(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

[0019] 其中， $Z$  是滚珠的数量， $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  和  $\varphi_3$  分别是所有滚珠在轴向力  $F_a$ 、径向力  $F_r$  和倾覆力矩  $M$  方向上的合力的表达式。由此，便可以解得整个滚道沿滚珠的载荷分布情况。然后根据载荷的大小将回转支承划分成  $n$  组，根据分布的对称性，则每组有 4 段滚道，共计  $4n$  段回转支承滚道；

[0020] 3) 选取某回转支承，给其施以 100% 极限设计载荷，利用试验台试验至回转支承因滚道严重失效造成试验机卡死；

[0021] 4) 记录下回转支承卡死时运转过的圈数  $t_f$ ，将被试回转支承取下试验台并拆解。

按照步骤 2) 中方法将回转支承定圈切割成  $4n$  段, 测量每段回转支承滚道的体积磨损量  $W_i$ , 其中最大的体积磨损量为  $W_{\max}$ ;

[0022] 5) 根据公式  $t_i = \frac{t_f W_{\max}}{W_i}$  分别计算出各段回转支承滚道的伪失效疲劳寿命,  $t_i$  表示各段回转支承滚道的伪疲劳失效寿命。

[0023] 6) 将步骤 5) 中求得的  $4n$  回转支承的伪失效疲劳寿命按照 2) 中的方法分为  $n$  组, 每组 4 个样本, 求解出  $n$  个应力水平下的回转支承寿命威布尔分布函数  $R_m(t) = \exp[-(t/\eta_m)^{\beta_m}]$  ( $m=1,2,3,\dots,n$ ) 中的  $n$  个  $\beta$  和  $\eta$  的值。

[0024] 7) 根据公式  $\ln \eta = a+b\ln Q$ , 利用步骤 2) 中求解的对应的载荷值  $Q_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots, n$ ) 和 6) 中求解的  $\eta_m$  ( $m=1, 2, 3, \dots, n$ ) 和拟合出常数  $a, b$  的值, 从而建立起回转支承特征寿命  $\eta$  与回转支承滚道中所承受的最大载荷  $Q$  的关系模型;

[0025] 8) 对于选取的回转支承, 由步骤 2) 可求得特定工况下的最大滚道载荷  $Q$ , 由步骤

6) 可知其疲劳寿命威布尔分布斜率  $\beta_{mean} = \frac{\sum_{m=1}^n \beta_m}{n}$ , 由步骤 7) 可知其特征寿命  $\eta_r$ , 于是便建

立起其剩余疲劳寿命的可靠性预测模型:  $x = \eta \left\{ \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta_{mean}} - \ln[R(x)] \right\}^{\frac{1}{\beta_{mean}}} - t$ ,  $\beta$  为威布尔分布的斜率,  $R$  为可靠度,  $\eta$  为特征寿命,  $x$  为剩余寿命。

[0026] 所述步骤 1) 中  $n$  的取值为  $n \geq 4$ 。大于等于 4 的目的是保证数据拟合的精度,  $n$  越大, 数据拟合的精度越高, 获得的模型越准确, 但是不建议大于 10, 因为  $n$  太大会造成成本过高。

[0027] 本发明结合了 Archard 轴承磨损理论和逆幂率加速寿命模型, 利用大型回转支承巨大的尺寸和滚道载荷的对称性建立起大型回转支承载荷——滚道磨损量——回转支承寿命的关系模型。

[0028] 本发明只需要对一个回转支承进行全寿命的疲劳寿命试验, 即可获得同系列回转支承的剩余寿命预测模型。

[0029] 进行全寿命的疲劳寿命试验前需准备一套可以对大型回转支承施加轴向力、径向力和倾覆力矩的试验台, 装配好回转支承后对其施以 100% 极限载荷, 运行至回转支承因失效而卡死。

[0030] 将回转支承滚道划分为  $4n$  个区域,  $n$  越大越好, 要求  $n$  不小于 4, 这是为了确保在拟合  $n$  个回转支承疲劳寿命威布尔分布时的精度。对试验失效后的回转支承, 由式 (2)、式 (3) 和式 (4) 可得到其剩余寿命分布的参数  $\beta_{mean}$  和  $\eta_r$ , 最后由式 (5) 得出回转支承剩余寿命的预测方程。

$$[0031] \quad t_i = \frac{t_f W_{\max}}{W_i} \quad (2)$$

$$[0032] \quad \ln \eta = a+b\ln Q \quad (3)$$

$$[0033] \quad \beta_{mean} = \frac{\sum_{m=1}^n \beta_m}{n} \quad (4)$$

$$[0034] \quad x = \eta \left\{ \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta_{mean}} - \ln[R(x)] \right\}^{\frac{1}{\beta_{mean}}} - t \quad (5)$$

[0035] 本发明的有益效果是：

[0036] 本发明的一种基于小样本试验的大型回转支承剩余寿命预测方法优越性如下：

[0037] 1、提供了一种基于威布尔分布可靠性的大型回转支承的剩余寿命预测方法(目前无相关文献和专利)

[0038] 2、结合 Archard 磨损理论和逆幂率加速寿命模型建立起“回转支承载荷——滚道磨损量——回转支承疲劳寿命”的模型

[0039] 3、将回转支承滚道按载荷分布特性分为 4n 段,通过一次加速寿命试验获得多组失效寿命的试验数据,相比传统的威布尔建模过程需要批量地对多组试件进行试验,在保证模型准确的前提下大大降低了试验成本,为企业节约资源。

[0040] 4、试验中给回转支承加载 100% 极限载荷,在不改变失效机理的前提下加速了试验进程,提高了试验效率。

[0041] 5、回转支承试验台结构简单,操作方便,使得回转支承寿命预测模型建模过程简洁高效,易于实施。

附图说明：

[0042] 图 1 为本方法的实施流程图。

[0043] 图 2 为滚珠与滚道的受力接触示意图。

[0044] 图 3 为回转支承定圈滚道的载荷分布图。

[0045] 图 4a 为对回转支承定圈进行疲劳寿命试验的试验台的正面结构示意图。

[0046] 图 4b 为对回转支承定圈进行疲劳寿命试验的试验台的侧面结构示意图。

[0047] 图 5 为回转支承失效后分割的各段滚道的磨损量检测结果图。

[0048] 图 6 为回转支承剩余寿命预测曲线图。

具体实施方式：

[0049] 下面结合附图对本发明作进一步描述：

[0050] 如图 1 所示,本方法的实施步骤如下：

[0051] 1) 根据威布尔寿命分布理论  $R = \exp[-(t/\eta)^\beta]$ , 推导出基于可靠性的回转支承

的剩余寿命预测模型  $x = \eta \left\{ \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta - \ln[R] \right\}^{\frac{1}{\beta}} - t$ 。R 是可靠度, t 是回转支承已经运转的圈

数,  $\beta$ 、 $\eta$  分别是威布尔分布的斜率和对应轴承的特征寿命,需要通过试验确定。

[0052] 2) 根据赫兹接触理论和 ISO281 方法求解出回转支承滚道的载荷分布。设回转支承受到的外载荷分别是：轴向力  $F_a$ 、径向力  $F_r$  和倾覆力矩 M, 对于某一滚珠, 如图 2 所示, 设其与滚道四点接触的接触力分别为  $Q_{1x}$ ,  $Q_{1y}$ ,  $Q_{2x}$  和  $Q_{2y}$ , 由于回转支承在实际工况中除了沿轴

向的旋转外其他自由度都被约束,因此每个滚珠对滚道的合力应该与外载荷达到平衡,由此可得:

[0053]

$$F_r + \sum_{i=1}^Z \varphi_1(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

[0054]

$$F_a + \sum_{i=1}^Z \varphi_2(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

[0055]

$$M + \sum_{i=1}^Z \varphi_3(Q_{1x}, Q_{1y}, Q_{2x}, Q_{2y}) = 0$$

[0056] 其中,  $Z$  是滚珠的数量,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  和  $\varphi_3$  分别代表了所有滚珠在轴向力  $F_a$ 、径向力  $F_r$  和倾覆力矩  $M$  方向上的合力。由此,便可以解得整个滚道沿滚珠的载荷分布情况如图 3 所示。然后根据载荷的大小将回转支承划分成  $n$  组,根据分布的对称性,则每组有 4 段滚道,共计  $4n$  段回转支承滚道;

[0057] 3) 选取某回转支承,给其施以 100% 极限设计载荷,包含轴向力、径向力和倾覆力矩,利用试验台试验至回转支承因滚道严重失效造成试验机卡死,如图 4 所示,  $G_1$ 、 $G_2$  分别为第一轴向力加载油缸和第  $n$  轴向力加载油缸,  $G_3$  为径向力加载油缸,  $G_4$  为液压驱动马达。

[0058] 4) 记录下回转支承卡死时运转过的圈数  $t_r$ ,将被试回转支承取下试验台并拆解。按照步骤 2) 中方法将回转支承定圈切割成  $4n$  段,测量每段回转支承滚道的体积磨损量  $W_i$ ,其中最大的体积磨损量为  $W_{max}$ ,如图 5 所示。

[0059] 5) 根据公式  $t_i = \frac{t_r W_{max}}{W_i}$  分别计算出各段回转支承滚道的伪失效疲劳寿命,  $t_i$  表示各段回转支承滚道的伪疲劳失效寿命。

[0060] 6) 将 5) 中求得的  $4n$  回转支承的伪失效疲劳寿命按照 2) 中的方法分为  $n$  组,每组 4 个样本,求解出  $n$  个应力水平下的回转支承寿命威布尔分布函数  $R_m(t) = \exp[-(t/\eta_m)^{\beta_m}]$  ( $m=1,2,3,\dots,n$ ) 中的  $n$  个  $\beta$  和  $\eta$  的值。

[0061] 7) 根据公式  $\ln \eta = a + b \ln Q$ , 利用 2) 中求解的对应的载荷值  $Q_m$  ( $m=1,2,3,\dots,n$ ) 和 6) 中求解的  $\eta_m$  ( $m=1,2,3,\dots,n$ ) 和拟合出常数  $a, b$  的值,从而建立起回转支承特征寿命  $\eta$  与回转支承滚道中所承受的最大载荷  $Q$  的关系模型。

[0062] 8) 对于选取的回转支承,由步骤 2) 可求得特定工况下的最大滚道载荷  $Q$ ,由步骤

6) 可知其疲劳寿命威布尔分布斜率  $\beta_{mean} = \frac{\sum_{m=1}^n \beta_m}{n}$ , 由步骤 7) 可知其特征寿命  $\eta_r$ , 于是便

建立起其剩余疲劳寿命的可靠性预测模型:  $x = \eta \left\{ \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta_{mean}} - \ln[R(x)] \right\}^{\frac{1}{\beta_{mean}}} - t$ , 如图 6 所示。

[0063] 上面所述的实施例仅仅是对本发明的优选实施方式进行了描述,并非对本发明的构



思和范围进行限定,在不脱离本发明设计构思前提下,本领域中普通工程技术人员对本发明的技术方案作出的各种变型和改进,均应落入本发明的保护范围,本发明请求保护的技术内容已经全部记载在权利要求书中。

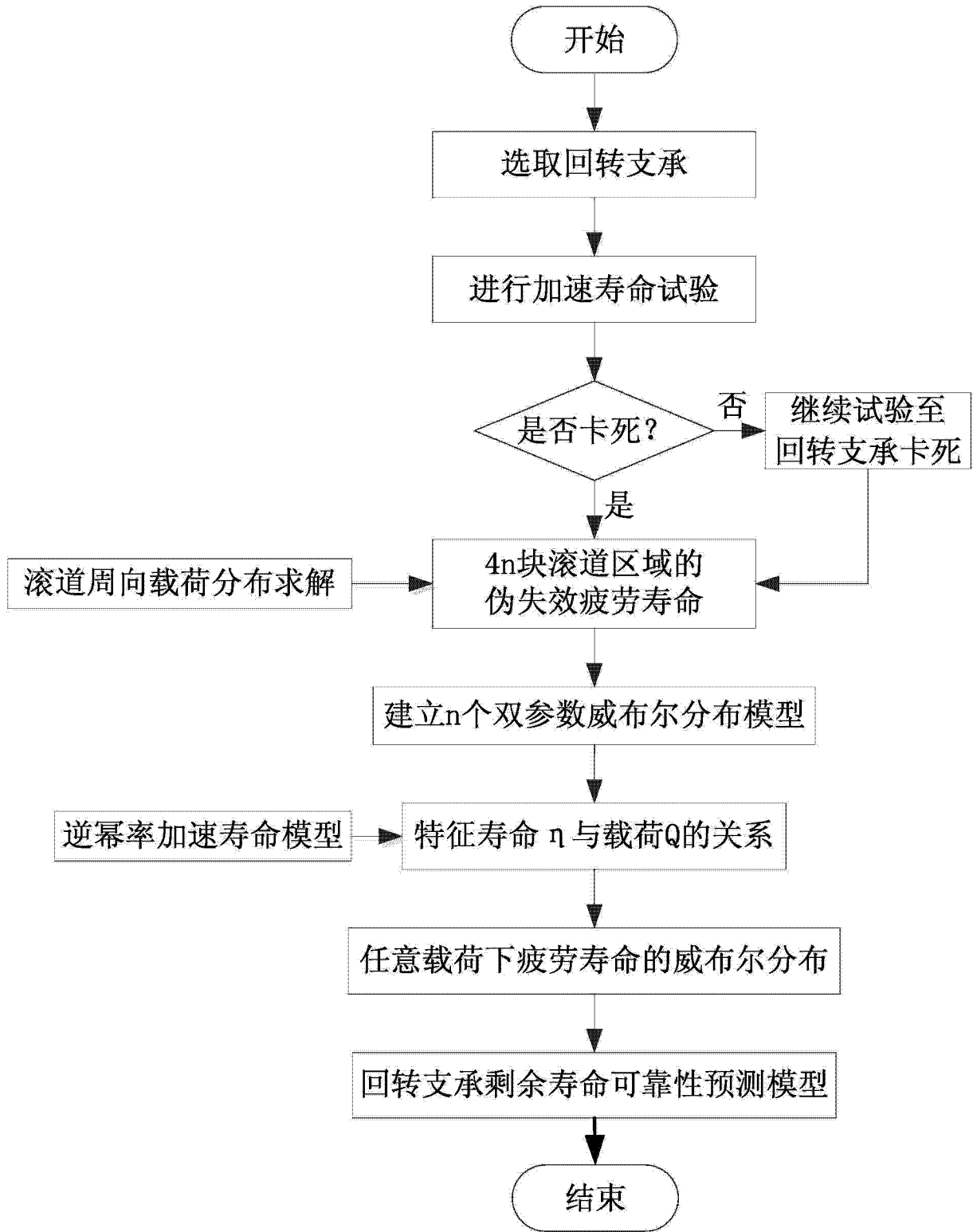


图 1

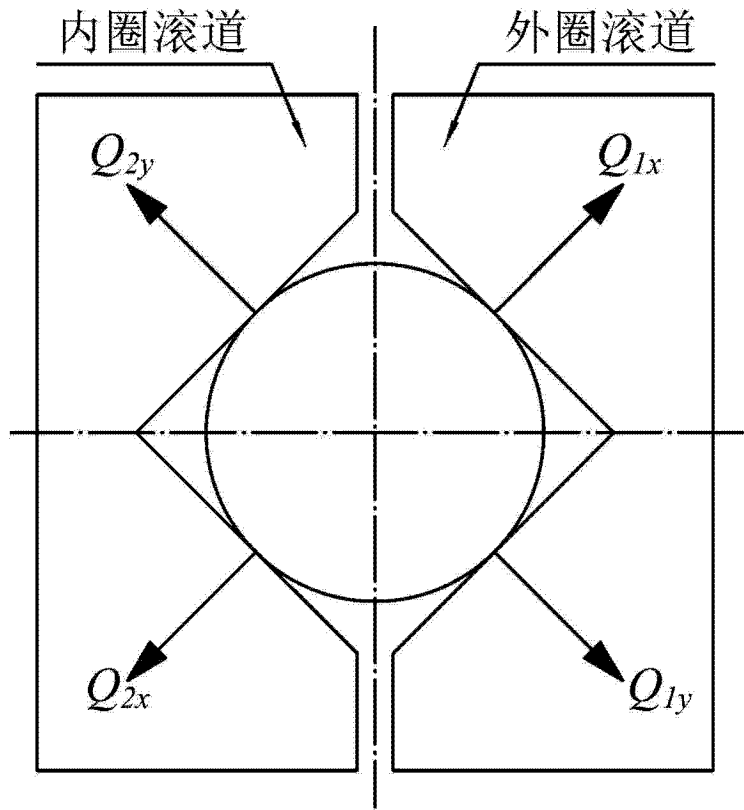


图 2

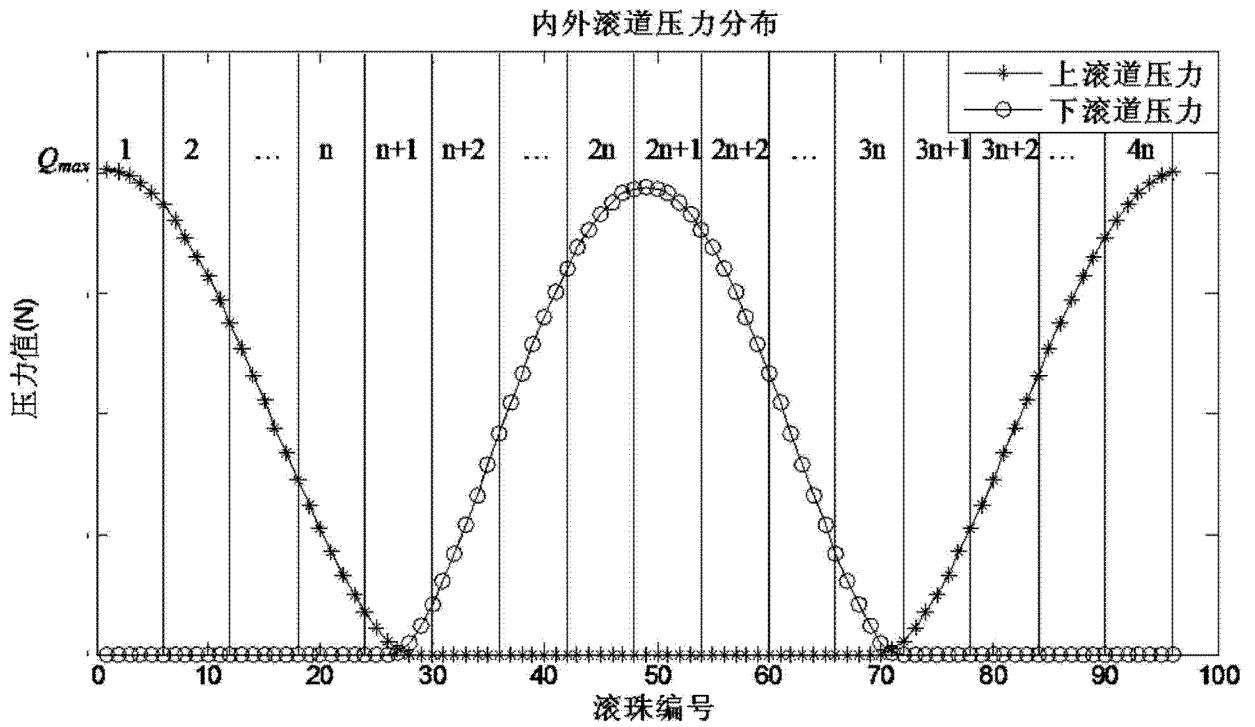


图 3

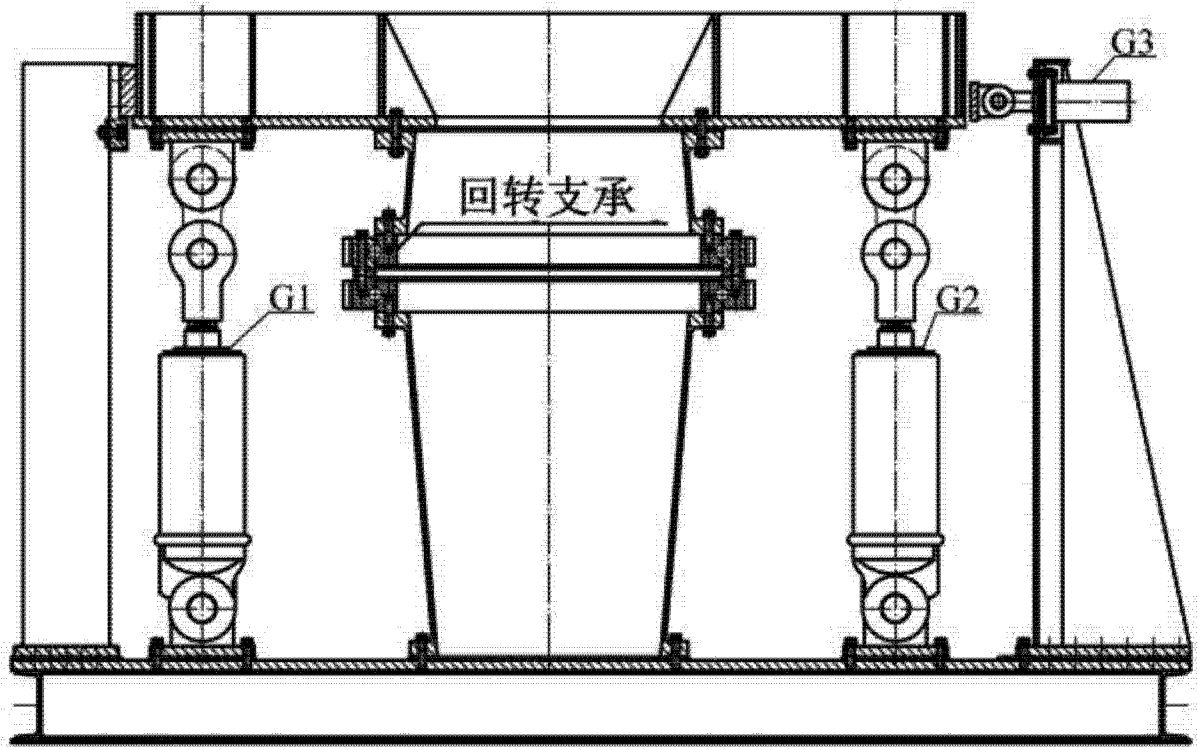


图 4a

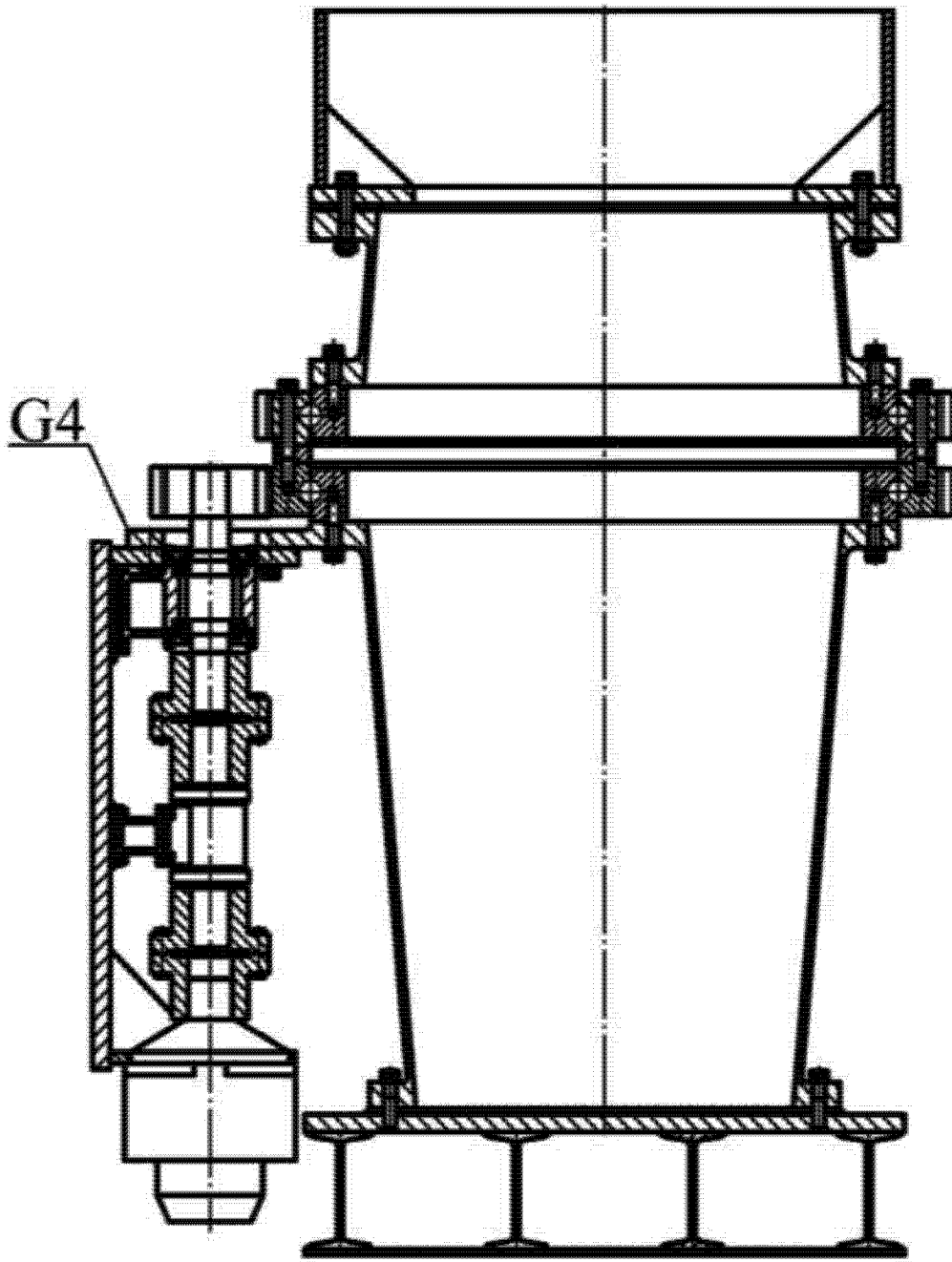


图 4b

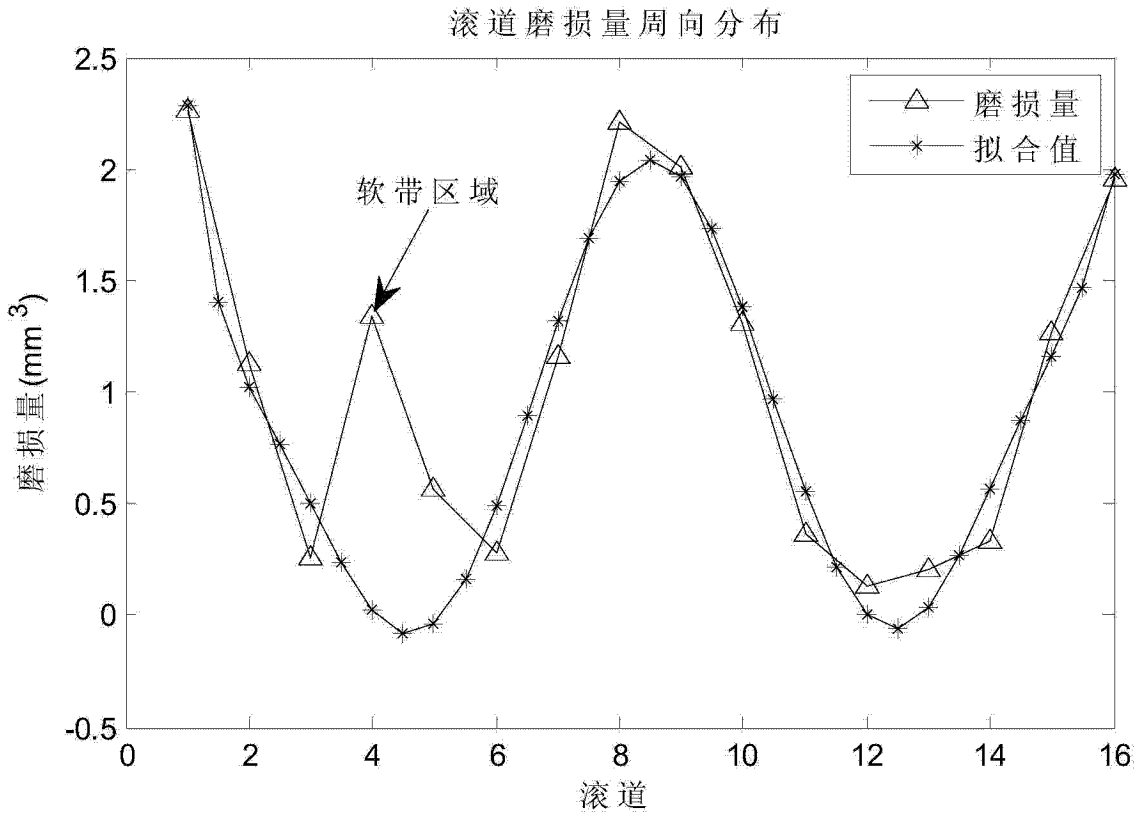


图 5

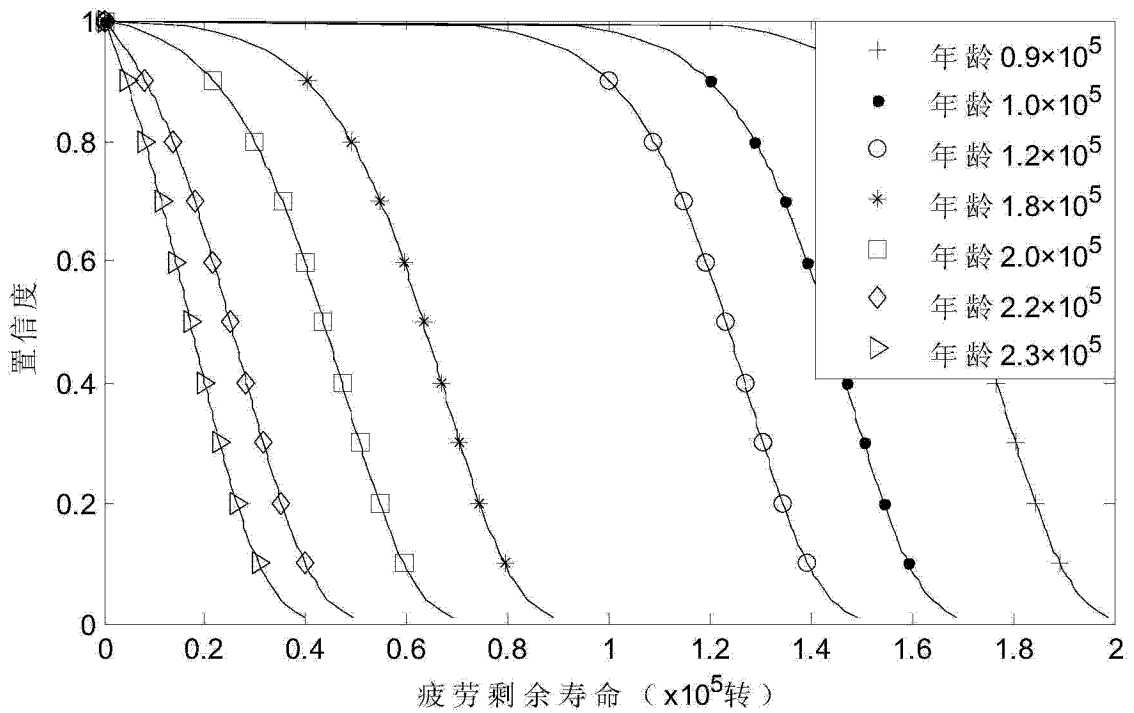


图 6