

多种失效模式相关的机构运动可靠度 计算方法

李 昌, 玄成明, 韩 兴, 宋 华

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘 要: 机构运动中必然存在多种相关失效模式, 多为影响机构运动的各类随机变量函数. 为了在机构运动可靠性分析中有效考虑多种相关失效模式的影响, 建立了考虑多种失效模式相关条件下的机构运动可靠度计算模型, 并实现了对多种失效模式相关条件下的机构运动可靠度计算模型的求解, 为考虑多种相关失效模式下的机构运动可靠性分析提供了一种有效途径. 以 6408 滚动轴承为例, 进行 100 000 抽样计算, 考虑失效模式相关条件下运动可靠度为 95.9989%. 该方法精度较高, 具有一定的理论意义和应用价值.

关 键 词: 随机误差; 相关失效模式; 机构运动可靠性; 可靠度; Monte Carlo 法

中图分类号: V215; TH122

文献标志码: A

Mechanism motion reliability calculation method considering correlative multi-failure modes

LI Chang, XUAN Cheng-ming, HAN Xing, SONG Hua

(School of Mechanical Engineering and Automation,

University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning 114051, China)

Abstract: There exists inevitably correlative multi-failure modes in a mechanism motion process; in most cases, they were described as random error functions. In order to analyze effectively these influences of correlative multi-failure modes on mechanism motion, a motion reliability calculation model was built by taking these multi-failure modes into account, and then the mechanism reliability results could be solved by this model. Taking type 6408 ball bearing as an example, the motion reliability value was 95.9989% after 100 000 times sampling calculations. It showed that this method has high accuracy and is helpful to the theoretical research and practical applications.

Key words: random errors; correlative failure modes; mechanism motion reliability; reliability degree; Monte Carlo method

传统工程计算, 采用的力学模型参数通常具有确定性, 用均值参数系统代替实际系统. 研究表明, 当实际系统变异性较大或各部分变异不均匀时, 计算得出的系统识别结果会存在偏差. 实际工程系统的随机性表现在: ①材料特性的随机性; ②元件几何尺寸的随机性; ③结构边界条件的随

机性; ④物理性质的随机性^[1-2].

机构运动可靠度是衡量系统质量好坏的重要指标, 该领域的研究始于 20 世纪 80 年代. 20 世纪 90 年代, 欧美及俄罗斯取得一定进展. 随着机械设备系统向高速、精密、重载、复杂化方向发展, 对机械系统运动精度提出了严格的要求. 机构运

收稿日期: 2013-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(E050402, 51105187); 辽宁省博士启动基金(20111059);

辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2012025); 辽宁科技大学专项基金(2011zx03)

作者简介: 李昌(1980—), 男, 辽宁凌源人, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事机械可靠性工程方面的研究.

动可靠度是机构在规定条件下,规定时间内,精确、及时、协调地完成规定动作的概率度量^[3]。

因机械系统的复杂性,存在多种失效模式相关,有多个极限状态方程,这些方程同为某些随机变量的函数,给机构运动可靠度的建模和计算带来困难,不能利用独立的串联相乘理论求可靠度,也不能用完全相关的薄弱环节理论计算可靠度。目前,相关模式下可靠度计算方法包括界限法、相关系数法、近似求解法等,这些方法需要对失效模式间的关系作出假设或者简化,有的方法对于超过5种以上相关失效模式问题难以求解,很难工程实用化。综观国内外,目前机构运动可靠性分析理论研究仍停留于单一模式的可靠度计算水平,而更符合客观实际和更科学化的模式的相关机构运动可靠性分析进展缓慢。本文建立了考虑多种失效模式相关条件下的机构运动可靠度计算模型,并对计算模型进行求解,为考虑多种相关失效模式下的机构运动可靠性分析提供一种有效途径。

1 考虑多种失效模式相关条件下的机构运动可靠度计算模型

假设影响机械系统运动的一组随机变量为 $\mathbf{X}$, $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_m]^T$, $X_h (h=1, 2, 3, \dots, m)$ 为基本随机变量,设定机构由使用要求确定的性能输出参数为 $Y_k (k=1, 2, 3, \dots, s)$,其为随机变量 $\mathbf{X}$ 的函数,即有

$$Y_k = f_k(\mathbf{X}) = f_k(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) \quad (1)$$

设定机构输出参数的允许极限值为 $(z_{k, \text{down}}, z_{k, \text{up}})$, $(k=1, 2, 3, \dots, s)$,即机构具有 s 种失效模式,必然存在 s 个系统极限状态方程,且第 k 种失效模式下,机构性能输出参数达到规定要求的运动可靠度为

$$R_k = P(z_{k, \text{down}} \leq Y_k \leq z_{k, \text{up}}) \quad (k=1, 2, 3, \dots, s) \quad (2)$$

则 s 种失效模式相关条件下机构运动可靠度为

$$R = P\left\{\bigcap_{k=1}^s R_k\right\} = P\left\{\bigcap_{k=1}^s [z_{k, \text{down}} \leq Y_k \leq z_{k, \text{up}}]\right\} \quad (3)$$

2 机构运动精度可靠度理论计算

针对每种单一失效模式,计算机构运动可靠度,建立机构输出参数与影响机构输出参数变化的随机变量间关系模型。设机构运动方程为^[4]

$$\mathbf{F}(\mathbf{Y}, \mathbf{X}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_\eta]^T$ 为机构, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]^T$ 为机构输入运动; $\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_n]^T$ 为考虑随机误差时,机构参数向量; $\mathbf{F} = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_\eta]^T$ 为 η 个独立方程,可解出 η 个输出。

输出位移、速度和加速度分别为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}, \mathbf{p})$$

$$\dot{\mathbf{Y}} = - \left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right] \dot{\mathbf{X}}$$

$$\ddot{\mathbf{Y}} = - \left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \dot{\mathbf{Y}} + \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right] \ddot{\mathbf{X}} + \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right] \dot{\mathbf{X}} \right]$$

其中

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_\eta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial y_\eta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_\eta}{\partial y_1} & \frac{\partial f_\eta}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_\eta}{\partial y_\eta} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_\eta}{\partial x_1} & \frac{\partial f_\eta}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_\eta}{\partial x_m} \end{bmatrix}$$

系统随机误差可记为

$$\begin{cases} \mathbf{Y} = \mathbf{Y}^* + \Delta \mathbf{Y} = \mathbf{Y}^* + \overline{\Delta \mathbf{Y}} + \mathbf{Y}^0 \\ \mathbf{X} = \mathbf{X}^* + \Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}^* + \overline{\Delta \mathbf{X}} + \mathbf{X}^0 \\ \mathbf{p} = \mathbf{p}^* + \Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}^* + \overline{\Delta \mathbf{p}} + \mathbf{p}^0 \end{cases} \quad (5)$$

式中“*”为理想值,“—”为期望,“Δ”为偏差,“0”为中心化随机过程。 $\mathbf{p}$ 不随时间变化。

将式(4)泰勒展开,得

$$\Delta \mathbf{Y} = - \left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right] \Delta \mathbf{X} + \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right] \Delta \mathbf{p} \right] = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{Y}} = & - \left[\left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right] \right] \Delta \dot{\mathbf{X}} - \\ & \left\{ \left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right] - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right] \right\} \cdot \\ & \Delta \mathbf{X} - \left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right] - \right. \\ & \left. \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right] \right] \Delta \mathbf{p} \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)为输出位移误差与输入位移误差及系

统参数误差之间的函数. 对时间微分得到式(7), 即输出速度误差与输入速度误差及系统参数误差间的关系. 将式(7)对时间再次微分, 令

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \cdot \\ &\left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \right] \\ \mathbf{N} &= \\ &\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right) \right] \\ \mathbf{M}_1 &= \frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \left[\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) - \right. \\ &\left. \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) - 2 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \mathbf{M} \right] \\ \mathbf{N}_1 &= \frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \left[\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right) - \right. \\ &\left. \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right) - 2 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \mathbf{N} \right] \\ \Delta \ddot{\mathbf{Y}} &= - \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \Delta \ddot{\mathbf{X}} - \\ &2 \mathbf{M} \Delta \dot{\mathbf{X}} - \mathbf{M}_1 \Delta \mathbf{X} - \mathbf{N}_1 \Delta \mathbf{p} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)表明输出与输入加速度误差、输入速度误差、输入位移误差及结构参数误差间的关系. 进而得出机构运动输出误差期望为

$$\begin{aligned} E(\Delta \mathbf{Y}) &= - \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) E(\Delta \mathbf{X}) - \\ &\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right) E(\Delta \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E(\Delta \dot{\mathbf{Y}}) &= - \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) E(\Delta \dot{\mathbf{X}}) - \\ &\mathbf{M} E(\Delta \mathbf{X}) - \mathbf{N} E(\Delta \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E(\Delta \ddot{\mathbf{Y}}) &= - \left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) E(\Delta \ddot{\mathbf{X}}) - \\ &2 \mathbf{M} E(\Delta \dot{\mathbf{X}}) - \mathbf{M}_1 E(\Delta \mathbf{X}) - \mathbf{N}_1 E(\Delta \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (11)$$

机构输出误差方差为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_Y &= \left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \right] \cdot \\ \mathbf{S}_X &\left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \right]^T + \left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right) \right] \cdot \\ &\mathbf{S}_p \left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{p}} \right) \right]^T \\ \mathbf{S}_{\dot{Y}} &= \left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \right] \cdot \\ \mathbf{S}_X &\left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \right]^T + \mathbf{M} \mathbf{S}_X \mathbf{M}^T + \mathbf{N} \mathbf{S}_p \mathbf{N}^T \\ \mathbf{S}_{\ddot{Y}} &= \left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \right] \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{S}_X \left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^{-1}}{\partial \mathbf{Y}} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right) \right]^T + \\ &\mathbf{M} \mathbf{S}_X \mathbf{M}^T + \mathbf{M}_1 \mathbf{S}_X \mathbf{M}_1^T + \mathbf{N}_1 \mathbf{S}_p \mathbf{N}_1^T \\ \mathbf{S}_X &= \text{diag}(\sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2, \dots, \sigma_{x_m}^2) \\ \mathbf{S}_{\dot{X}} &= \text{diag}(\sigma_{\dot{x}_1}^2, \sigma_{\dot{x}_2}^2, \dots, \sigma_{\dot{x}_m}^2) \\ \mathbf{S}_{\ddot{X}} &= \text{diag}(\sigma_{\ddot{x}_1}^2, \sigma_{\ddot{x}_2}^2, \dots, \sigma_{\ddot{x}_m}^2) \\ \mathbf{S}_p &= \text{diag}(\sigma_{p_1}^2, \sigma_{p_2}^2, \dots, \sigma_{p_m}^2) \end{aligned}$$

设定功能函数为

$$H(k) = q - \Delta \mathbf{Y} > 0 \quad (12)$$

式中 $\Delta \mathbf{Y}$ 为输出误差, q 为允许极限误差, 式(12)表明输出误差要小于允许极限误差. 假设输出误差和允许极限误差均服从正态分布, 标准正态分布参量为 $u = \frac{k - \mu_k}{\sigma_k}$, 则可靠度为

$$R = P(k > 0) = \Phi\left(\frac{\mu_k}{\sigma_k}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_0 - \mu_u}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_u^2}}\right) \quad (13)$$

式(13)表明已知输出误差及允许极限误差即可求出系统某种失效模式下的运动可靠度^[5].

3 考虑多种失效模式相关的机构运动可靠度计算与求解

因影响机构运动的各类随机变量不一定均服从正态分布. 本文选取 Monte Carlo 法对多种相关失效模式条件的机构运动可靠度进行求解, 该数值计算方法适用于随机变量服从任意分布、随机变量任意组合的可靠度计算, 计算精度随着模拟次数的增加而提高, 而且简单、方便^[6-10]. 具体求解如下:

1) 设定 i 为循环控制变量, 抽样次数为 n , 选取一个较大初始值, 安全次数 R_m 设定某一初始值, 其余初始值暂设定为 0.

2) 每次循环中, 由随机变量 $X_h (h=1, 2, 3, \dots, m)$ 的分布类型产生 m 维随机矢量 $\mathbf{X}^h$.

3) 计算 $Y_k^h, (k=1, 2, 3, \dots, s)$.

4) 检验 $(z_{k, \text{down}} \leq Y_k^h \leq z_{k, \text{up}}), (k=1, 2, 3, \dots, s)$. 是否全部成立, 成立则 $R_m = R_m + 1$; 计算出 $R_k^h = P(z_{k, \text{down}} \leq Y_k^h \leq z_{k, \text{up}}), (k=1, 2, 3, \dots, s)$.

5) 检验 $i \geq n$ 是否成立, 则多种失效模式相关条件下的机构运动精度可靠度为

$$R = \frac{R_m}{n}$$

若不成立, $i = i + 1$, 返回 2) 继续计算^[11-12].

6) 输出机构运动可靠度.

考虑多种相关失效模式条件的机构运动可靠度求解流程如图 1.

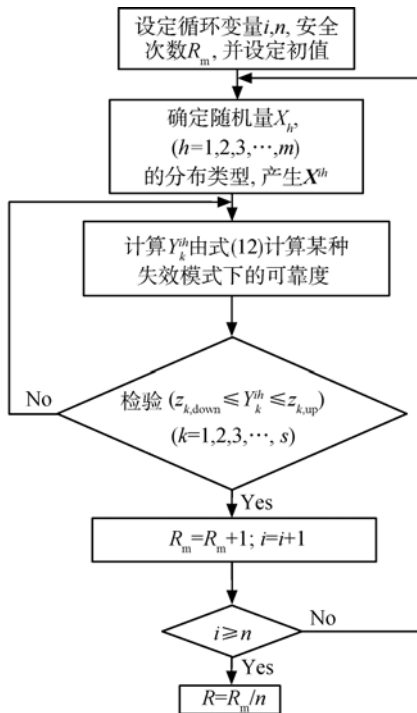


图 1 考虑多种相关失效模式机构运动可靠度计算流程

Fig. 1 Calculation process of mechanism motion reliability considering correlative multi-failure modes

4 计算实例

6408 滚动轴承的尺寸如表 1, 基于 ADAMS/View 软件建立其参数化样机, 如图 2. 考虑随机性误差的影响, 编制产生正态分布伪随机数函数 MRND(b), 也可构造其他分布类型. 修改与构件相关联的设计变量: $L = B + \text{MRND}(b)$ 其中 L 为设计变量, B 为符合某种分布的构件尺寸均值, b 为 MRND($\cdot$) 函数的主参数, 实现轴承 Monte Carlo 参数化^[13-15]. 计算过程如图 3.

6408 滚动轴承滚珠和内、外圈材质为轴承钢, 密度为 $7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比为 0.3; 保持架材质为黄铜, 密度为 $8.546 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 弹性模量为 $1.07 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比为 0.32. 轴承外圈固定, 各滚珠与内、外圈滚道以及保持架间为接触约束, 共定义 30 对接触. 内圈承受径向力为 50 N, 以转速 600 r/min 旋转. 仿真计算 0.05 s, 100 步, 图 4 为计算得出的轴承内圈运动曲线. 内圈径向跳动反映轴承的振动状态, 监测内圈动态特性可为研究轴承

振动噪音提供有效途径.

表 1 6408 滚动轴承尺寸

Table 1 Dimensions of the type 6408 ball bearing

参数 变量	参数 说明	均值/ mm	上偏差/ mm	下偏差/ mm
W_1	内圈内径	20	0	-0.012
W_2	外圈外径	55	0	-0.015
W_3	宽度	27	0	-0.120
W_4	径向游隙	0.005	+0.001	-0.001
W_5	滚珠直径	20	+0.001	-0.001
W_6	外圈内径	43	+0.001	-0.001
W_7	内圈外径	32	+0.001	-0.001
W_8	外滚道曲率半径	12	+0.001	-0.001
W_9	内滚道曲率半径	12	+0.001	-0.001

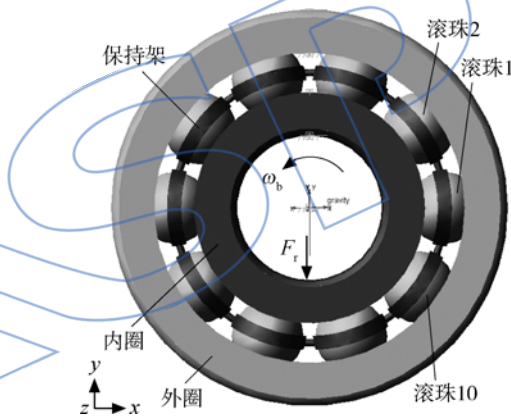


图 2 6408 滚动轴承参数化样机模型

Fig. 2 Parametric virtual model of the type 6408 ball bearing

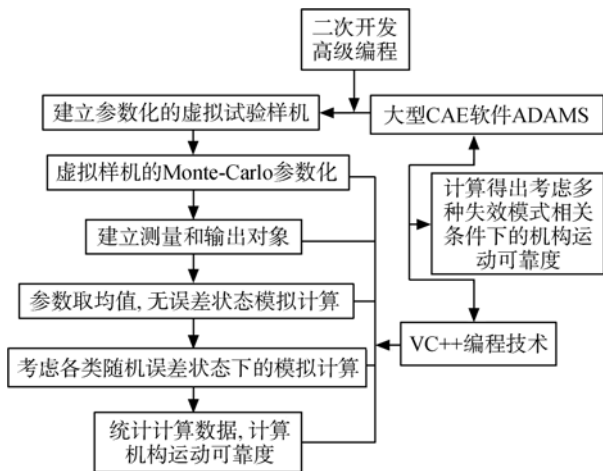


图 3 轴承运动可靠度计算分析流程

Fig. 3 Flow chart of motion reliability calculation process of the bearing

以 VC++6.0 软件为开发平台,结合 AD-MAS 软件二次开发功能,开发通用的轴承运动可靠性分析系统^[16-18].

对 6408 滚动轴承进行 10^5 次试验,位移极限误差特征值 $(\mu_0, \sigma_0) = (0.25, 0.15)$,允许速度极

限误差特征值 $(\mu_{v0}, \sigma_{v0}) = (0.35, 0.15)$,允许加速度极限误差特征值 $(\mu_{a0}, \sigma_{a0}) = (1, 0.15)$,求取轴承内圈径向跳动在规定误差范围内的可靠度. 计算得出 $t=0.01\text{ s}$ 时可靠度,列于表 2.

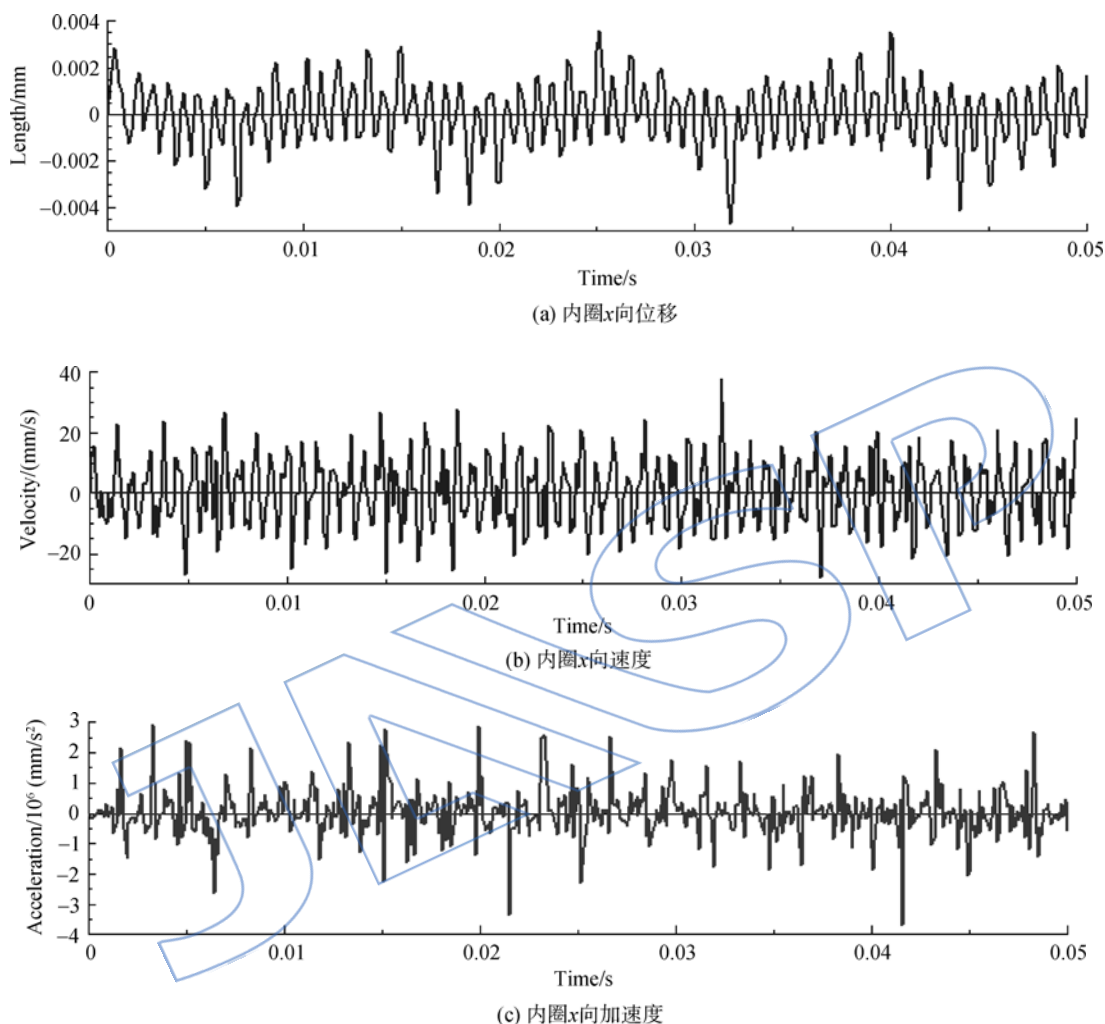


图4 0.05 s内 6408 滚动轴承内圈动态曲线

Fig. 4 Inner ring's dynamic curves of 6408 ball bearing within 0.05 s

表2 6408 滚动轴承运动可靠度计算结果

Table 2 Caculation results of the 6408 ball bearing motion reliabilities

仿真次数	径向跳动位移可靠度	径向跳动速度可靠度	加速度可靠度	考虑失效模式相关条件下运动可靠度
100 000	0.999 628	0.986 693	0.974 678	0.959 989

计算表明:同时考虑位移、速度和加速度等多种失效模式相关条件下,机构运动可靠度要比只考虑单一失效模式下的机构运动可靠度明显偏低.可见,以某种主要失效模式的机构运动可靠度来权衡系统运动可靠性是不全面的.因此,求解机构运动可靠度时,考虑多种失效模式相关是合理

的也是必要的.

5 结 论

1) 建立了考虑多种失效模式相关条件下的机构运动可靠度计算模型并对模型进行了理论计算求解.

2) 以 6408 滚动轴承为计算实例,对考虑多种失效模式相关条件下的机构运动可靠度进行计算求解,得出考虑失效模式相关条件下其运动可靠度为 95.9989%。

参考文献:

- [1] 闫明,张义民,孙志礼.机械零件相关失效可靠度及灵敏度计算的 Monte Carlo 方法[J].东北大学学报,2011,32(6):835-837.
YAN Ming, ZHANG Yimin, SUN Zhili. Monte Carlo method for computing of reliability and sensitivity of mechanical components with dependent failure modes[J]. Journal of Northeastern University, 2011, 32(6): 834-837. (in Chinese)
- [2] 喻天翔,宋笔锋.机械零件多失效模式相关可靠度算法研究[J].机械强度,2006,28(4):508-511.
YU Tianxiang, SONG Bifeng. Research on calculating the reliability of mechanical component with correlated failure modes[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(4): 508-511. (in Chinese)
- [3] 孙志礼,赵乃素.多种失效形式时机械零件的可靠度计算[J].东北工学院学报,1993,14(1):60-63.
SUN Zhili, ZHAO Naisu. Reliability calculation of a machine component failed in different modes[J]. Journal of Northeast University of Technology, 1993, 14(1): 60-63. (in Chinese)
- [4] 孙志礼,陈良玉.实用机械可靠性设计理论与方法[M].北京:科学出版社,2003.
- [5] 喻天翔.多模式失效的机械零件可靠度计算新理论[J].机械工程学报,2003,39(3):135-137.
YU Tianxiang. Reliability computing new theory of mechanical elements with multi failure mode[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3): 134-137. (in Chinese)
- [6] 陈卫平,张云清,任卫群.机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 周金宇,谢里阳,王学敏.失效相关结构系统可靠性分析及近似求解[J].东北大学学报,2004,25(1):74-77.
ZHOU Jinyu, XIE Liyang, WANG Xuemin. Approximate method to reliability prediction of failure dependent system [J]. Journal of Northeastern University, 2004, 25(1): 74-77. (in Chinese)
- [8] 刘维信.机械可靠性设计[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [9] 武清玺.结构可靠性分析及随机有限元法:理论、方法、工程应用及程序设计[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [10] Hassan M. Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method[J]. International Journal Impact Engineering, 2004, 24(2): 203-217.
- [11] 李昌.基于响应面法齿轮啮合传动可靠性灵敏度分[J].航空动力学报,2011,26(3):711-715.
LI Chang. Analysis of reliability sensitivity for gear engagement based on response surface methods[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 711-715. (in Chinese)
- [12] 李昌,韩兴,孙志礼.基于机构运动精度可靠性虚拟实验方法研究[J].机械设计,2007,24(11):17-20.
LI Chang, HAN Xing, SUN Zhili. Reliability virtual test of mechanism motion accuracy[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(11): 17-20. (in Chinese)
- [13] 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [14] Merlet J P, Daney D. Dimensional synthesis of parallel robots with a guaranteed given accuracy over a specific workspace[C]//Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005: 942-947.
- [15] 安伟光,蔡荫林.随机结构系统可靠性分析与优化设计[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005.
- [16] 李永东.某型坦克齿轮接触疲劳强度可靠性的 Monte Carlo 数值模拟[J].机械强度,2006,28(1):46-50.
LI Yongdong. Monte Carlo numerical modeling of a tank gear's contact fatigue strength reliability[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(1): 46-50. (in Chinese)
- [17] 朱文予.机械可靠性设计[M].上海:上海交通大学出版社,1992.
- [18] 侯红玲,赵永强,魏伟峰.基于 ADAMS 的平面连杆机构运动分析与仿真[J].机械,2005(1):33-35.
HOU Hongling, ZHAO Yongqiang, WEI Weifeng. Dynamic analysis and simulation of the planar linkage in ADAMS [J]. Mechanic, 2005(1): 33-35. (in Chinese)