

文章编号:1000-8055(2009)10-2384-07

基于振动传递符号有向图的齿轮箱嵌入式 传感器优化配置模型与算法

陈仲生, 杨拥民, 李 聪, 尹剑飞

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对嵌入式条件下振动信号的采集方式、传递路径与传统方式不同的特点,采用有限元仿真方法,分析了嵌入式传感下齿轮箱故障振动的传递特性,在此基础上建立了基于故障振动传递符号有向图的优化配置模型,并研究了基于粒子群优化的求解算法.案例仿真结果验证了上述方法的有效性,为在齿轮箱内部合理嵌入传感器提供了一种可行途径.

关 键 词: 齿轮箱; 嵌入式诊断与预测; 嵌入式传感器优化配置; 符号有向图模型; 粒子群优化

中图分类号: TU317; TN911

文献标识码: A

Model and algorithm of optimal embedded sensors placement for gearboxes based on signed directed graph of vibration propagation

CHEN Zhong-sheng, YANG Yong-min, LI Cong, YIN Jian-fei

(College of Mechanical Engineering and Automation,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Owing to the fact that sampling ways and propagation paths of vibration signals under embedded ways are much different from those of traditional methods, the fault vibration propagation characteristics in a gearbox under the condition of embedded sensing were studied based on finite element simulations. Then, an optimal placement model was built based on signed directed graph(SDG) of faults vibration propagation in a gearbox, and a solution algorithm was proposed based on particle swarm optimization(PSO). Finally, an example was presented and simulation results demonstrate that the proposed methods are feasible, providing an effective way to embed sensors into a gearbox.

Key words: gearboxes; embedded diagnosis/ embedded prognosis (ED/ EP); optimal embedded sensors placement; signed directed graph (SDG) model; particle swarm optimization (PSO)

齿轮箱是直升机动力传动系统中的关键部件,由于其独特的构型,一般没有冗余备份,一旦发生故障往往会导致灾难性的后果,迫切需要配备实时状态监测和故障诊断系统,实现基于状态的维修.已有的齿轮箱故障诊断方式主要是通过在其箱体表面安装传感器测量并分析振动信号来实现的,

但这种外部追加传感器的方式凸现出明显的不足:一方面,测量信号很容易受相关结构振动以及环境噪声的影响,信噪比低;另一方面,直升机齿轮箱外部一般不允许追加传感器.因此,研究一种实时状态信号获取与故障在线诊断方法是当前直升机齿轮箱故障诊断领域需要解决的重要课题之一.

收稿日期: 2008-10-13; **修订日期:** 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(50805142)

作者简介: 陈仲生(1977-),男,安徽桐城人,副研究员,博士,主要从事机电系统嵌入式诊断与预测技术研究.

嵌入式诊断与预测 (ED/EP) 技术是由美军率先提出的一种新思想^[1],它是在装备内部嵌入智能微传感器,实时、在线地提供装备状态信息,准确识别故障并预测潜在的故障,其本质就是在设计时使设备自身具备故障诊断与预测能力。由此可见,ED/EP 将是解决未来直升机齿轮箱健康监控问题的一种有效技术途径。对齿轮箱嵌入式诊断与预测来说,微传感器的嵌入必然会对齿轮箱的结构完整性产生破坏,这就需要嵌入尽可能少的传感器覆盖尽可能多的故障,因此进行嵌入式传感器优化配置尤为重要。目前不同传感器优化配置方法在振动控制、模态实验等领域得到广泛研究,比如神经网络、遗传算法等^[2]。而在故障诊断领域,已有的传感器优化配置方法大多数针对外部安装传感器的方式,且集中于定性分析,缺乏一个有效的量化模型^[3]。Zhang^[4]在故障诊断与预测的统一框架下,研究了一种一般性的传感器优化配置量化模型,但没有明确阐述如何确定模型的参数(因为这与具体应用密切相关)。为此,本文借鉴文献[4]的思想,通过分析嵌入式传感下故障振动信号与备选传感器之间的传递特性,建立齿轮箱嵌入式传感器优化配置的量化模型,并通过有限元建模分析确定模型参数,最后针对该优化模型的特点引入粒子群优化算法进行求解。

1 齿轮箱三维有限元建模

为了分析嵌入式传感下的齿轮箱振动传递特性,采用有限元建模是一种既方便、又经济的有效方法。为此,本文选取一种双级圆柱直齿齿轮箱为研究对象,首先对其进行三维有限元建模。

双级圆柱直齿齿轮箱的具体结构数据如下:

- 1) 高速级:传动比为 2.5;小齿轮的齿数为 20、齿宽为 95 mm;大齿轮的齿数为 50、齿宽为 90 mm;模数为 5;中心距为 175 mm。
- 2) 低速级:传动比为 4;小齿轮的齿数为 19、齿宽为 95 mm;大齿轮的齿数为 76、齿宽为 90 mm;模数为 3;中心距为 143 mm。

由于双级齿轮箱的结构比较复杂,如果采用 Ansys 软件布尔运算命令进行三维建模,代价较大。为此,本文先采用 Solidworks 软件绘制齿轮箱三维实体结构图;然后将绘制的图形通过通用三维数据格式导入到 Ansys 软件中,得到齿轮箱三维实体模型;最后,通过定义单元属性、网格生成控制和自由网格划分,得到齿轮箱传动系统的三维有限元模型。建模结果如图 1 所示。

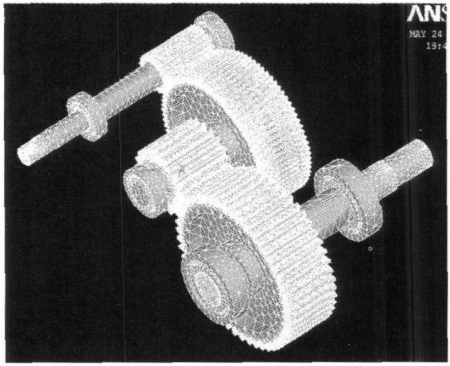


图 1 齿轮箱传动系统三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element model of a gearbox

2 齿轮箱故障振动传递特性仿真分析

在齿轮箱嵌入式故障诊断中,当不同位置的零部件发生故障时,故障产生的振动在齿轮箱内部沿不同的路径进行传递,同时产生衰减。于是,不同测点处嵌入的传感器对该振动信号的敏感度不同,也即对该故障的检测能力也不相同。因此,通过分析故障振动在整个齿轮箱内部的传递特性,就可以为定量表示每个嵌入式传感器对该故障的检测能力提供一种有效度量方法,进一步可以为建立嵌入式传感器的优化配置模型提供理论依据。

众所周知,齿轮和轴承是齿轮箱中最容易发生故障的位置^[5],为此本文首先选取 10 个备选的传感器嵌入位置,如图 2 所示;反过来,这 10 个位置也代表了 10 种可能的不同类型故障。

在进行有限元仿真分析时,每次在其中一个位置施加一个模拟故障振动的时变载荷;然后计

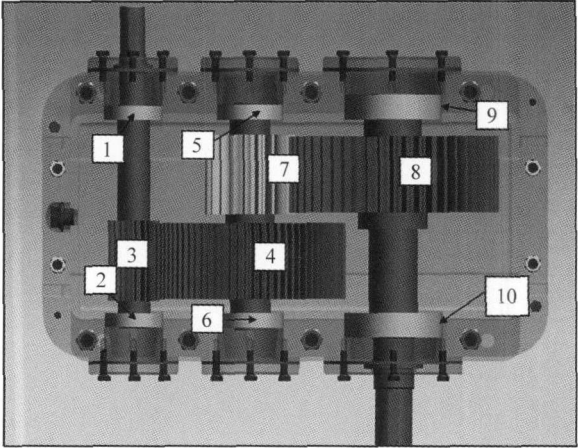


图 2 齿轮箱嵌入传感器备选位置示意图

Fig. 2 Selected places for embedded sensors in the gearbox

算其它各个位置的响应情况;最后可以计算出振动衰减大小与传递时间的定量信息。

本文中约定施加的故障模拟时变载荷(单位: N)形式为

$$F_Y = \begin{cases} 0 & t < 100 \\ 2(t - 100) & 100 \leq t < 200 \\ 200 & t \geq 200 \end{cases} \quad (1)$$

经过 10 次仿真分析后,就可以得到两两备选位置之间的振动传递特性信息,为下面的数学建模提供必需的理论依据和定量数据。

3 齿轮箱振动传递符号有向图模型

一般来说,齿轮箱的振动传递特性关系比较复杂,需要采用合适的描述方式。而符号有向图(SDG)是描述大规模复杂系统的一种有效方式,它通过节点和有向支路表示了系统变量或局部之间的因果影响关系^[6]。为此,本文利用 SDG 来描述齿轮箱系统的故障振动传递特性,其中每个节点表示齿轮箱中的传感器嵌入备选位置;两个节点之间的有向线段表示存在一条故障传递路径;每条有向线段由“+”或“-”标示,分别表示信号在该路径传递过程中增强或衰减。最后,建立的齿轮箱振动信号传递 SDG 模型如图 3 所示。

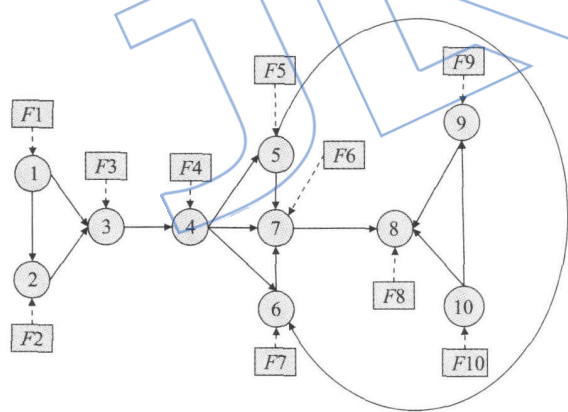


图 3 齿轮箱故障振动传递符号有向图模型

Fig. 3 SDG of fault vibration propagation in the gearbox

根据图 3 中的 SDG 模型,如果存在一条通路使得故障 i 的信号传递至传感器 j ,记传递路径中的信号强度变化集为 $\{C_{ij1}, C_{ij2}, \dots, C_{ijn}\}$,传递时间集为 $\{t_{ij1}, t_{ij2}, \dots, t_{ijn}\}$,其中 n 表示传递过程中经历的支路数,则约定如下:

1) 传感器 j 检测到故障 i 的一条路径中总的检测时间为

$$T_{ij} = \sum_{k=1}^n t_{ijk} \quad (2)$$

2) 传感器 j 检测到故障 i 的一条路径中总的信号增益为

$$G_{ij} = \prod_{k=1}^n C_{ijk} \quad (3)$$

当然,传感器 j 检测到故障 i 的信号有可能是从多条路径分别传递过来的。为了简化分析过程,本文约定传感器 j 检测到故障 i 的时间(T_{TDij})为传递时间最短的那条路径所用的时间,信号总增益为所有路径传递增益之积。

4 齿轮箱嵌入式传感器优化配置模型

4.1 齿轮箱嵌入式传感器的故障检测能力定义

齿轮箱嵌入式传感器优化配置的最终目的是要利用尽可能少的传感器覆盖尽可能多的齿轮箱故障,简言之也就是要在满足所需故障检测能力的前提下,优化配置嵌入式传感器。为此,本文给出如下约定:

定义 1: 单个传感器的故障检测能力 d_{ij} 表示为嵌入式传感器 j 对故障 i 的检测能力;传感器平均故障检测能力 D_i 表示为嵌入式传感器系统对故障 i 的平均检测能力。

一般来说,嵌入式传感器的故障检测能力是一个综合评价参数,主要取决于传感器信噪比、故障反应相对速度和检测灵敏度 3 个因素。

1) 信噪比

在相同条件下,信噪比越低表示传感器越难检测到故障产生的异常振动信号,即单个传感器故障检测能力越小;反之,信噪比越高,单个传感器故障检测能力越大。

2) 故障反应相对速度

故障反应相对速度定义为反应时间(T_{TD})和故障形成时间(T_{TF})之比。反应时间(T_{TD})是故障由初始状态演化到传感器能够检测到故障信号所用的时间;故障形成时间(T_{TF})是故障由初始状态演化到最终故障发生所用的时间。本文仿真分析时约定施加模拟时变载荷的初始时刻是故障初始时刻,时变载荷达到稳定值的时刻是故障真正形成的时刻,从而由有限元分析可以计算出传感器的故障反应相对速度。

3) 检测灵敏度

传感器故障检测灵敏度的大小不仅仅与传感器本身的分辨率有关,还与故障信号的“分辨率”有关(即能够检测出的故障信号最小变化值)。因此,传感器检测灵敏度可表示为

$$\text{检测灵敏度} = \frac{\Delta s / r_s}{\Delta f / \Delta f_{\min}}$$

其中 Δs 是传感器输出信号的变化; Δf 是故障产生的异常振动信号的变化; r_s 为传感器的分辨

$$d_{ij} = \begin{cases} [1 + e^{-10 \times (V_{ij} - 0.5)}]^{-1} \times [1 + e^{-(\gamma_{\text{SNR}_j} - 0.5)}]^{-1} \times \left(1 - \frac{T_{\text{TD}_{ij}}}{T_{\text{TF}_{ij}}}\right)^{0.5} & ; \text{ if } T_{\text{TD}_{ij}} < T_{\text{TF}_{ij}} \\ 0 & ; \text{ if } T_{\text{TD}_{ij}} \geq T_{\text{TF}_{ij}} \end{cases} \quad (4)$$

其中 V_{ij} 表示传感器 j 对故障 i 的检测灵敏度; γ_{SNR_j} 表示传感器 j 的信噪比; $T_{\text{TD}_{ij}}$ 表示传感器 j 对故障 i 的检测时间; $T_{\text{TF}_{ij}}$ 表示故障 i 相对于传感器 j 的发生时间。

定义 3: 进一步, 故障 i 的传感器平均故障检测能力定义为

$$D_i = \sum_{j=1}^m d_{ij} / m \quad (5)$$

其中 m 为嵌入式传感器的数目。

4.2 嵌入式传感器优化配置准则

为了建立嵌入式传感器的优化配置模型, 首先需要确定其优化准则, 即怎样的配置才算达到预定的优化目标, 它既是配置模型的优化目标, 同时也是约束条件。本文约定的嵌入式传感器优化配置准则如下:

1) 所有故障都能被检测到, 即每个故障的平均检测能力大于 0。为此, 定义 $\{0, 1\}$ 嵌入式传感器配置矩阵 B , 矩阵 B 的每一行对应一种故障位置, 每一列对应传感器配置情况。如 b_{ij} 为 1, 表示 j 位置安装传感器用来检测故障 i ; 否则若 b_{ij} 为 0, 则表示 j 位置不安装传感器检测故障 i 。

2) 某些故障的平均检测能力必须大于给定的阈值 D^* 。

3) 传感器故障检测的可靠性必须大于给定的阈值 R^* 。

4) 传感器成本及安装约束限制(假设成本 $\leq G$), 假设配置传感器 j 的平均成本为 C_j (包括传感器价格、安装、数据通信处理和和维护等费用总合), 传感器 j 的安装总数为 N_j , 则有

$$\sum_{j=1}^m (C_j \times N_j) \leq G \quad (6)$$

同理, 若系统中安装传感器最大数量限制为 $M_{\max}$, 则传感器数量限制条件为

$$\sum_{j=1}^m X_j + C_s \leq M_{\max}; \quad C_s \geq 0 \quad (7)$$

率; $\Delta f_{\min}$ 是故障信号变化的最小单位。

定义 2: 根据上述主要因素, 参考文献[4]定义单个传感器的故障检测能力为

以将传感器总数量 $\left(\sum_{j=1}^m X_j\right)$ 的最小化目标转化为求松弛变量 C_s 的最大值。

5) 所有故障不仅能被检测到, 并且能诊断出故障类型(发生位置)。

在定义了传感器优化配置准则后, 接下来就可以建立嵌入式传感器优化配置的数学模型。

4.3 基于符号有向图的优化配置模型建立

嵌入式传感器优化配置模型属于整数多目标规划问题, 其目标函数简单来说就是实现最大故障检测能力和最小传感器数量。解决多目标规划问题的最基本方法就是评价函数法, 根据上述思想, 本文将平均检测能力最大和传感器数目最小两个目标通过线性加权转化为一个目标函数, 构成齿轮箱嵌入式传感器优化配置模型, 权重系数的确定主要根据故障的严重性和可能发生故障的概率来确定, 如式(8)所示:

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{i=1}^N (K_i \times D_i) + \alpha \times C_s \right\} \\ & \text{s. t.} \\ & \left\{ \begin{aligned} D_i &= \frac{\sum_{j=1}^M (b_{ij} \times d_{ij})}{\sum_{j=1}^M b_{ij}} > 0; & i = 1, 2, \dots, N \\ D_i &\geq D_i^*; & \forall i \in M_D \\ R_i &= \prod_{j=1}^M [1 - (b_{ij} \times P_{F_i})^{X_j}] > R_i^*; & i = 1, 2, \dots, N \\ R_i &\geq R_i^*; & \forall i \in M_R \\ \sum_{j=1}^m (C_j \times N_j) &\leq G \\ \sum_{j=1}^m X_j + C_s &= \max\{M\} \\ C_s &\geq 0 \\ X_j &\leq N_j; & j = 1, 2, \dots, M \\ X_j &\geq 1 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N b_{ij} \geq 1; & j = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)中 C_s 是松弛变量, 取非负整数。因此, 可

其中

K_i ——故障 i 检测能力权重系数,由该故障的破坏的严重性和发生的概率确定;

d_{ij} ——传感器 j 对故障 i 的单个传感器故障检测能力;

D_i ——传感器系统对故障 i 的平均检测能力;

α ——传感器成本权重系数;

C_s ——传感器数目松弛变量;

C_j ——传感器 j 的成本;

C_t ——资金成本限制;

b_{ij} —— $\{0,1\}$ 变量,构成传感器配置矩阵 B ,表示传感器配置与故障检测之间的关系, b_{ij} 为 1,表示 j 位置安装传感器用来检测故障 i ,否则若 b_{ij} 为 0,则表示 j 位置不安装传感器检测故障 i ;

X_j ——传感器备选位置 j 配置的传感器数目;

D_i^* ——根据故障的破坏性和发生概率确定的故障 i 的检测能力下限值;

N ——故障类型总数;

M ——传感器的数量;

R_i ——对故障 i 的诊断可靠性;

R_i^* ——根据故障的破坏性和发生概率确定的对故障 i 诊断的最低可靠性;

M_R ——各个故障检测可靠性指标集合;

M_D ——各个故障检测平均检测能力集合;

P_{F_j} ——传感器 j 发生故障的概率;

N_j ——位置 j 可以放置的传感器最大数目。

5 基于粒子群优化的求解算法与实例仿真分析

很明显,模型(8)是一个组合优化问题,而已有的绝大多数优化算法在求解组合优化问题时,往往存在算法复杂、实现困难、计算代价大以及搜索效率低等不足。粒子群优化(PSO)是由美国社会心理学家 Kennedy 和电气工程师 Eberhart 共同提出的,其优势在于实现简单、参数少,具有较强的全局优化能力,可有效解决离散和组合优化问题^[7]。为此,本文将研究基于粒子群优化的齿轮箱嵌入式传感器优化配置算法。

齿轮箱嵌入式传感器优化配置模型(8)是一个非线性整数规划模型,约束条件既有等式约束也有不等式约束。为了应用粒子群优化算法求解该模型,首先需要将该非线性整数规划模型转化为标准粒子群优化模型形式。

实际中常用添加惩罚函数的方法将约束优化问题转化为非约束优化问题,为此分别定义传感器检测能力和惩罚函数的权重系数为 P_D, P_R ,考虑到传感器检测能力要求在大多数情况下比其可靠性要求高,本文取 $P_D = 0.8, P_R = 0.2$ 。于是通过增加惩罚函数,可以将优化模型(8)转化为标准 PSO 模型形式,如式(9)所示:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^N \left\{ \left(K_i \times D_i \right) + \alpha \times C_s + P_D \times \right. \\ & \left. \left(D_i - D_i^* \right) + P_R \times \left(R_i - R_i^* \right) \right\} \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \sum_j^m X_j + C_s = M_{\max} \\ X_j \leq N_j; \quad j = 1, 2, \dots, M \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^M b_{ij} \times d_{ij}}{\sum_{j=1}^M b_{ij}},$$

$$R_i = \prod_{j=1}^M [1 - (b_{ij} \times P_{F_j})^{X_j}]; \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

传感器的优化目的是从 10 个备选传感器嵌入位置中选取最优的传感器数目和位置。为此,应用粒子群优化算法求解式(9)时,每一个粒子用一个 10 维的 $0-1$ 向量 $\{S_1, S_2, \dots, S_{10}\}$ 来表示,其位置表示一组候选解,即嵌入式传感器可能的配置位置及数量。若 $S_i = 1$,则说明第 i 个位置需要配置嵌入式传感器;若 $S_i = 0$,则不需要配置嵌入式传感器。应用粒子群优化算法时,首先初始化随机生成 100 个粒子构成粒子群体,并给出每个粒子的初始速度;然后每个粒子按照给定的行为规则运动,确定粒子运行的速度和下一次的位置;如此不断更新粒子群中各粒子的速度和位置,最终得到最优解。

确定目标函数中各部分的权重系数是求解嵌入式传感器优化配置模型的一个重要环节,本文主要通过根据以下经验引进重要度分析计算得到权重系数 K_i, α : ①齿轮发生故障的破坏最严重,轴承发生故障的破坏性和发生概率其次;②高速齿轮比低速齿轮更容易损坏;③承重轴更容易发生故障;④离齿轮越近的轴承越容易发生故障。

为了简单起见,本文在求解时取以下参数值:

1) 每个传感器成本为 100 元,总成本限制为 1000 元,即最大传感器安装数量为 10;

- 2) 故障发生后影响到的第一个传感器的检测灵敏度基准为 1,检测时间基准为 100 ms;
- 3) 所有传感器的可靠性均近似为 1 (传感器失效率 $P_F^* \approx 0.001$);
- 4) 定义所有传感器最小检测能力和最小可靠性分别为 $D^* = 0.5, R^* = 0.9$.

为了计算各个传感器的故障检测能力,本文首先通过有限元仿真分析,计算得到故障振动传递过程中的时间和增益定量信息,如表 1 所示,进而由式(4),(5)计算得到故障检测能力.

表 1 齿轮箱各传感器故障检测能力的计算参数
Table 1 Parameters for calculating fault-detecting ability

节点路径		方向	增益	传递时间/ms
起始	终止			
F1	1	-	0.71	1.0
F2	2	-	0.71	1.0
1	2	-	0.09	3.8
2	3	-	0.20	2.0
1	3	-	0.27	2.5
F3	3	-	1.00	1.0
3	4	+	1.15	1.0
4	5	-	0.30	3.0
5	6	-	0.03	4.0
4	6	-	0.10	2.0
4	7	-	0.96	1.0
6	7	-	0.10	3.0
F7	7	-	1.20	1.0
F5	5	-	0.80	1.0
F6	6	-	0.76	1.0
7	8	+	2.29	2.0
F8	8	-	1.44	1.0
9	8	-	0.10	2.0
10	8	-	0.07	2.0
F9	9	-	0.64	1.0
F10	10	-	0.72	1.0
F4	4	-	1.10	1.0

设置好所需的模型参数后,就可应用粒子群优化(PSO)算法求解优化模型(9),计算结果如表 2 所示.可见选中的传感器数目为 4,位置分别是第 3,4,7 个和第 8 个备选位置.

表 2 PSO 算法求解结果
Table 2 Results using a PSO algorithm

模型及结果	数值
传感器数目	4
传感器位置	S ₃ , S ₄ , S ₇ , S ₈
传感器最小故障检测能力	0.4998
传感器平均故障检测能力	0.9833

为了检验 PSO 算法计算结果的正确性,本文对选取 4 个传感器的所有情况进行全局搜索,计算每一种情况下的传感器平均故障检测能力,如图 4 所示.

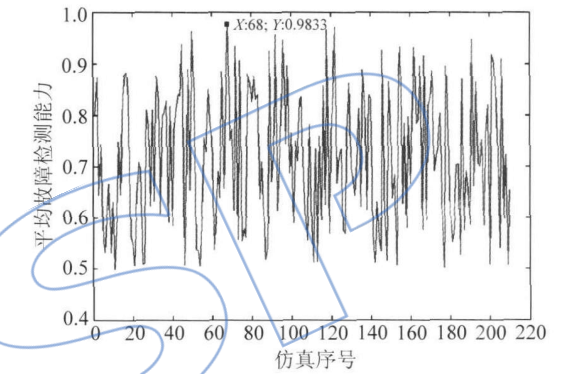


图 4 4 个传感器的故障检测能力全局搜索结果
Fig. 4 Global searching results of fault-detecting ability under the condition of four sensors

由图 4 可见,在所有 4 个传感器情况下,当仿真序号为 68 时,传感器平均故障检测能力达到最大,为 0.9833,可以查到此时对应的传感器配置组合为{S₃, S₄, S₇, S₈},这与表 2 得到的优化结果一致.

6 结 论

嵌入式传感器的优化配置是实现齿轮箱嵌入式诊断与预测需要解决的关键技术之一,但由于嵌入式传感器采集振动信号的方式、传递路径与传统方法有明显的差别不同,因此已有的传感器优化配置模型存在局限性.本文在分析嵌入式传感下齿轮箱故障振动传输机理的基础上,采用有限元仿真方法,建立了基于故障振动信号传递符号有向图的优化配置模型,研究了基于 PSO 的求解算法,为在齿轮箱内部合理嵌入传感器提供了一种可行途径.

参考文献：

[1] Leah M K, Russel R. Embedded diagnostics and prognostics synchronization for army transformation [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2004,6: 3733-3741.

[2] 刘福强, 张令弥. 作动/ 传感器优化布置的研究进展[J]. 力学进展, 2000, 30(4) : 506-516.

LIU Fuqiang, ZHANG Lingmi. Advances in optimal placement of actuators and sensors[J]. Advances in Mechanics, 2000,30(4) :506-516. (in Chinese)

[3] Raghuraj R, Bhushan M, Rengaswamy R. Locating sensors in complex chemical plants based on fault diagnostic observability criteria[J]. AIChE Journal, 1999, 45 (2) : 310-322.

[4] ZHANG Guangfan. Optimum sensor localization/ selection in a diagnostic/ prognostic architecture[D]. GA, U. S. A. : Georgia Institute of Technology, 2005.

[5] 陈仲生, 杨拥民, 胡政, 等. 基于循环平稳时间序列的齿轮裂纹故障早期检测[J]. 航空动力学报, 2005, 20 (1) : 154-158.

CHEN Zhongsheng, YANG Yongmin, HU Zheng, et al. Early detection of gear crack based on cyclic time series [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1) : 154-158. (in Chinese)

[6] 杨帆, 萧德云. SDG 建模及其应用的进展[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5) : 767-774.

YANG Fan, XIAO Deyun. Review of SDG modeling and its application [J]. Control Theory and Applications, 2005, 22(5) : 767-774. (in Chinese)

[7] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]// Proc. IEEE International Conference on Neural Networks. Australia: IEEE, 1995,4: 1942-1948.