工程系统健康描述及基于 GFRF 方法的健康监测

高占宝 李行善 梁 旭 于劲松

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 健康管理概念是伴随着工程系统应用而产生的. 针对目前复杂系统综合健康管理技术领域缺乏有效的系统健康表示方法的问题,提出了健康向量、健康指数、健康函数、健康态变映射、健康状态映射等一系列描述工程系统健康的基本概念. 与传统的部件状态参数描述方法相比,引入健康向量等概念可以全面地描述系统级健康,并且能够有效地刻画系统健康的动态变化本质. 分析了 Volterra 级数系统描述方法和广义频率响应函数分析技术,利用系统健康形式化定义构建系统健康向量,讨论了一类非线性系统基于广义频率响应函数的健康监测技术. 以非线性弹簧-阻尼-质量块系统为研究对象,通过仿真计算,给出了系统健康监测数据与系统健康指数的对应关系. 仿真实验结果证明了系统健康形式化描述方法的有效性以及基于广义频率响应函数健康监测方法的可行性.

关 键 词: 系统健康; 健康向量; 健康指数; 广义频率响应函数; 健康监测

中图分类号: TP 202; TP 206^{+}. 3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1026-05

Engineering system health formulation and health monitoring based on GFRF approach

Gao Zhanbao Li Xingshan Liang Xu Yu Jinsong

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The health management concept was burgeoned as the application of engineering system. Several basic formulation definitions, such as health vector, health index, health function, were presented to mitigate the lack of formal concepts for the system health. Compared with the traditional condition parameters based component health description method, the engineering system level health condition can be effectively represented and the dynamic essence of health decrease can be revealed by using the health formulation definitions. Employing the Volterra series system description approach and analyzing the system through generalized frequency response function(GFRF), the system health vector was constructed based on the concepts of engineering system health, and the health of a kind of nonlinear system was monitored by the GFRF method. The nonlinear spring-mass-dashpot system was used as the research object. The relation between system health monitoring data and health index was given through simulation. And the simulated data show that the system health formulation definitions are effective and the system health monitoring approach based on GFRF is feasible.

Key words: system health; health vector; health index; generalized frequency response function (GFRF); health monitoring

对复杂工程系统进行现代意义上的综合健康管理的概念最早出现于 20 世纪 90 年代. 经过十几年的发展,目前国外已经大量开展复杂系统综合健康管理(CSIHM, Complex System Integrated Health Management)关键技术研究和系统验证工作,有些综合健康管理系统已进入工程应用阶

收稿日期: 2005-11-11

作者简介: 高占宝(1974-),男,黑龙江安达人,博士生, gaozhanbao@tom.com.

段[1]. 然而从公开发表的资料上看,人们对工程系统健康的理解仍然是定性的,缺乏严格明确的数学定义,往往将系统健康通俗地定义为系统及其子系统的整体状态. 基于这种系统健康定性的描述方法,管理活动也只能局限于 4 类[2]:①诊断;②缓解/减轻影响;③修复;④检验. 这种对系统健康的定性理解和表述方法,不但容易引起概念的混淆,也限制了系统健康管理活动的精细划分和管理决策的制订,更不利于系统健康管理研究的深入开展.

本文首先在基于状态参数(CP, Condition Parameters)的健康表示基础上,提出一系列有关工程系统健康的基本定义;然后围绕这些基本定义,给出一种基于广义频率响应函数(GFRF, Generalized Frequency Response Function)的工程系统健康监测方法;最后利用仿真手段,验证形式化健康定义的合理性以及基于 GFRF 健康监测方法的可行性.

1　系统健康定义

对于工程系统而言,健康用于描述系统在一定环境条件下,执行系统的设计功能从而完成指定任务的能力. J. P. M. Smeulers 等人利用 CP 表征系统部件健康[3],这种健康描述方式对于系统组成部件或子系统而言是有效的,但对于系统总体健康缺乏恰当的表现能力. 为了全面描述系统健康,本节在 Smeulers 方法基础上,提出用构造健康向量方式描述系统健康[4],具体定义如下.

定义 1　工程系统健康.

$$\boldsymbol{h}(t)=(p_1(t),p_2(t),\cdots,p_m(t))^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中,t 代表时间参数;健康分量 $p_i(t)\in\mathbf{R}(i=1,2,\cdots,m,m\in\mathbf{N})$ 代表 CP. 要求 CP 为可度量的物理参数,能够表征部件磨损或退化,例如液压泵的内部泄漏程度、过滤器的污染程度、电池的内阻、液压作动器的摩擦等. 对于 CP 要求具备 3 个基本特征:①可测(直接可测或间接可测);②能够量化性能退化程度;③可以进行趋势分析,即随时间逐渐变化.

定义 2　健康函数.

$$\phi:H\to[0,1],\boldsymbol{h}(t)\mapsto h_i \text{ 或 } h_i=\phi(\boldsymbol{h}(t)) \tag{2}$$

健康函数 ϕ 把健康空间 H 中的一个向量点映射成为一个实数 h_i,称 h_i 为健康指数.

定义 3　健康态变映射.

$$\gamma:H\times T\times D\to H \tag{3}$$

其中,T 为时间参数集;H 为健康空间;D 是未知扰动集合,即 $D=\{\boldsymbol{d}(\cdot)\}$,$\boldsymbol{d}(\cdot)$ 表示系统扰动向量;$H\times T\times D$ 为笛卡尔积.

$\forall t_0,t\in T,t_0<t,\hat{\boldsymbol{h}}=\boldsymbol{h}(t_0)\in H$ 且 $\boldsymbol{d}(\cdot)\in D$,健康向量可以表示为

$$\boldsymbol{h}(t)=\gamma(t,t_0,\hat{\boldsymbol{h}},\boldsymbol{d}(\cdot))\in H \tag{4}$$

健康态变映射 γ 反映工程系统健康的动态变化,在具备有关 γ 的知识以后,可以根据系统使用/维修情况,对系统健康退化和剩余可用寿命进行有效估计. 健康态变映射必满足以下性质:

1) 自反性,即 $\forall t\in T,\hat{\boldsymbol{h}}\in H$,以及 $\boldsymbol{d}(\cdot)\in D$,有

$$\boldsymbol{h}(t)=\gamma(t,t,\hat{\boldsymbol{h}},\boldsymbol{d}(\cdot))=\hat{\boldsymbol{h}} \tag{5}$$

2) 传递性,即 $\forall t_0,t_1,t_2\in T,t_0<t_1<t_2$,$\hat{\boldsymbol{h}}\in H$,以及 $\boldsymbol{d}(\cdot)\in D$,有

$$\begin{aligned}\boldsymbol{h}(t_2)&=\gamma(t_2,t_0,\hat{\boldsymbol{h}},\boldsymbol{d}(\cdot))=\\&\gamma(t_2,t_1,\gamma(t_1,t_0,\hat{\boldsymbol{h}},\boldsymbol{d}(\cdot)),\boldsymbol{d}(\cdot))=\\&\gamma(t_2,t_1,\boldsymbol{h}(t_1),\boldsymbol{d}(\cdot))\end{aligned} \tag{6}$$

3) 因果性,即 $\forall t_0,t\in T,t_0<t,\hat{\boldsymbol{h}}\in H$,$\boldsymbol{d}(\cdot)\in D$,有

$$\boldsymbol{h}(t)=\gamma(t,t_0,\hat{\boldsymbol{h}},\boldsymbol{d}(\cdot))=\gamma(t,t_0,\hat{\boldsymbol{h}},\boldsymbol{d}'(\cdot)) \tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{d}'(\cdot)$ 表示系统从 t_0 到 t 的扰动作用.

定义 4　健康状态映射. 从控制系统的观点看,被控过程的状态直接反应系统的运行状态[5]. 在一定的前提条件下,可以定义健康状态映射为

$$\psi:X\to H,\boldsymbol{x}(t)\mapsto\boldsymbol{h}(t) \text{ 或 } \boldsymbol{h}(t)=\psi(\boldsymbol{x}(t)) \tag{8}$$

其中,$\boldsymbol{x}(t)$ 为系统状态向量;X 为系统状态空间,健康状态映射把系统状态空间元素映射到系统健康空间的一个健康向量. 对于工程系统来说,其输入输出特性往往可以通过测量获得. 通常可以利用观测器和滤波器的方法对系统进行状态估计,通过构造适当的健康状态映射 ψ 和统计检验方法,可以确定系统的健康向量.

2　基于 GFRF 的系统健康监测方法

基于 GFRF 的系统健康监测方法基本思路是:首先根据系统工作/组成原理,确定构成系统健康向量的状态参数分量,根据定义 1 构造健康向量 $\boldsymbol{h}(t)$,并确定健康函数 ϕ;然后根据非线性

系统的频率响应特性,检测系统健康向量状态;最后根据式(2)计算健康指数,判断系统健康状况.

2.1 系统的 Volterra 级数表示及 GFRF

定理1 任意连续时不变系统,若输入输出响应为解析函数,则该系统可用式(9)表示[6].

$$y(t)=\sum_{n=1}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}h_n(\tau_1,\tau_2,\cdots,\tau_n)\cdot\prod_{i=1}^{n}u(t-\tau_i)\mathrm{d}\tau_i=\sum_{n=1}^{\infty}y_n(t)\tag{9}$$

式(9)为 Volterra 级数. 其中,$h_n(\tau_1,\tau_2,\cdots,\tau_n)$称为系统的 n 阶 Volterra 核,或称为 n 阶广义脉冲响应函数; $y_n(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}h_n(\tau_1,\tau_2,\cdots,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}u(t-\tau_i)\mathrm{d}\tau_i$ 称为系统的 n 阶输出响应;u 为系统输入.

定理2 多维 Fourier 变换. 设 L_n^1 为 n 元绝对可积函数空间,L_n^2 为 n 元平方可积函数空间,L_n^∞ 为 n 元有界函数空间. 则 $\forall x\in L_n^1$,其多维 Fourier 变换 $F:L_n^1\to L_n^\infty$ 为

$$\hat{x}(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)=\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}x(t_1,t_2,\cdots,t_n)\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\omega_1t_1+\omega_2t_2+\cdots+\omega_nt_n)}\mathrm{d}t_1\mathrm{d}t_2\cdots\mathrm{d}t_n\tag{10}$$

$\forall x\in L_n^1\cap L_n^2$,必有 $\hat{x}\in L_n^2$,使得多维 Fourier 反演公式(11)成立.

$$x(t_1,t_2,\cdots,t_n)=(2\pi)^{-n}\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\hat{x}(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_1t_1+\omega_2t_2+\cdots+\omega_nt_n)}\mathrm{d}\omega_1\mathrm{d}\omega_2\cdots\mathrm{d}\omega_n\tag{11}$$

定理3 多变量 Fourier 变换. $\forall n\in\mathbf{N},x_i\in L^2$ 且 $\prod_{i=1}^{n}x_i\in L^2$,多变量 Fourier 变换为

$$F\left(\prod_{i=1}^{n}x_i\right)=(2\pi)^{-(n-1)}\cdot(\hat{x}_1(\omega)*\hat{x}_2(\omega)*\cdots*\hat{x}_n(\omega))\tag{12}$$

其中,$\hat{x}_i(\omega)=F(x_i)(\omega)$;$*$ 表示卷积.

根据3个定理给出的式(10)~式(12)可得:

1) n 阶 Volterra 核 $h_n(\tau_1,t_2,\cdots,\tau_n)$ 的多维 Fourier 变换为

$$\hat{h}_n(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)=\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}h_n(\tau_1,\tau_2,\cdots,\tau_n)\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\omega_1\tau_1+\omega_2\tau_2+\cdots+\omega_n\tau_n)}\mathrm{d}\tau_1\mathrm{d}\tau_2\cdots\mathrm{d}\tau_n\tag{13}$$

其中 $\hat{h}_n(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)$称为 n 阶 GFRF.

2) 系统 n 阶输出响应 $y_n(t)$的 Fourier 变换:

$$\hat{y}_n(\omega)=F(y_n)(\omega)=(2\pi)^{-(n-1)}\cdot\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}\hat{h}_n(\omega-\omega_2-\cdots-\omega_n,\omega_2,\cdots,\omega_n)\cdot\hat{u}(\omega-\omega_2-\cdots-\omega_n)\hat{u}(\omega_2)\cdots\hat{u}(\omega_n)\mathrm{d}\omega_2\cdots\mathrm{d}\omega_n\tag{14}$$

2.2 GFRF 的递推算法

通过非线性系统频域分析评估健康向量中各个分量值,必须首先求得 GFRF. 如果能够直接通过系统辨识的方法获得 GFRF,则可以在频域直接进行系统分析;如果已知系统微分方程模型,则可以通过时域到频域的变换得到 GFRF. 文献[6]给出了一种求解 GFRF 的递推算法.

对于可以用多项式类微分方程描述的系统(式(15)),其 GFRF 递推公式见式(16).

$$\sum_{n=1}^{N}\left[\sum_{p_1=0}^{M}\cdots\sum_{p_n=0}^{M}\left(a_{n,p_1,\cdots,p_n}\prod_{i=1}^{n}\mathrm{D}^{p_i}y(t)+c_{n,p_1,\cdots,p_n}\cdot\prod_{i=1}^{n}\mathrm{D}^{p_i}u(t)+\sum_{1\leqslant m\leqslant n-1}b_{n,m,p_1,\cdots,p_n}\cdot\prod_{i=1}^{m}\prod_{k=m+1}^{n}\mathrm{D}^{p_i}y(t)\mathrm{D}^{p_k}u(t)\right)\right]=0\tag{15}$$

其中,D 为微分算子;M 为最大微分阶数;N 为最大乘方次数;a,b,c 为系统参数;$u(t)$和 $y(t)$分别是系统输入和输出.

$$\hat{h}_1(\omega_1)=-A_1^{-1}(\mathrm{j}\omega_1)C_1(\mathrm{j}\omega_1)$$

$$\hat{h}_2(\omega_1,\omega_2)=-A_1^{-1}(\mathrm{j}(\omega_1+\omega_2))\cdot[C_2(\mathrm{j}\omega_1,\mathrm{j}\omega_2)+B_2(\mathrm{j}\omega_1,\mathrm{j}\omega_2)\hat{h}_1(\omega_1)+A_2(\mathrm{j}\omega_1,\mathrm{j}\omega_2)\hat{h}_1(\omega_1)\hat{h}_2(\omega_2)]$$

$$\vdots$$

$$\hat{h}_n(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n)=-A_1^{-1}(\mathrm{j}(\omega_1+\omega_2+\cdots+\omega_n))\cdot\left\{C_n(\mathrm{j}\omega_1,\mathrm{j}\omega_2,\cdots,\mathrm{j}\omega_n)+\sum_{s=2}^{\alpha_1}\sum_{k_1+k_2+\cdots+k_s=n}[A_s(\mathrm{j}(\omega_1+\cdots+\omega_{k_1}),\mathrm{j}(\omega_{k_1+1}+\cdots+\omega_{k_1+k_2}),\cdots,\mathrm{j}(\omega_{n-k_s+1}+\cdots+\omega_n))\cdot\hat{h}_{k_1}(\omega_1,\cdots,\omega_{k_1})\hat{h}_{k_2}(\omega_{k_1+1}+\cdots+\omega_{k_1+k_2})\cdots\hat{h}_{k_s}(\omega_{n-k_s+1}+\cdots+\omega_n)]+\sum_{s=1}^{\alpha_2}\sum_{k_1'+k_2'+\cdots+k_s'=n-2s}[B_{2s}(\mathrm{j}(\omega_1+\cdots+\omega_{k_1'}),\mathrm{j}(\omega_{k_1'+1}+\cdots+\omega_{k_1'+k_2'}),\cdots,\mathrm{j}\omega_{n-2s+1},\cdots,\mathrm{j}\omega_n)\cdot\hat{h}_{k_1'}(\omega_1,\cdots,\omega_{k_1'})\hat{h}_{k_2'}(\omega_{k_1'+1}+\cdots+\omega_{k_1'+k_2'})\cdots\hat{h}_{k_s'}(\omega_{n-2s-k_s'+1}+\cdots+\omega_{n-2s})]\right\}$$

其中　　$k_i, k_s' \in \mathbf{N}$

$$\left.\begin{aligned}
&A_n(\mathrm{j}\omega_1, \mathrm{j}\omega_2, \cdots, \mathrm{j}\omega_n) = \\
&\quad \sum_{p_1=0}^{M} \cdots \sum_{p_n=0}^{M} a_{n,p_1,\cdots,p_n} \prod_{i=1}^{n} (\mathrm{j}\omega_i)^{p_i} \\
&B_{n,m}(\mathrm{j}\omega_1, \mathrm{j}\omega_2, \cdots, \mathrm{j}\omega_n) = \\
&\quad \sum_{p_1=0}^{M} \cdots \sum_{p_n=0}^{M} b_{n,m,p_1,\cdots,p_n} \prod_{i=1}^{n} (\mathrm{j}\omega_i)^{p_i} \prod_{k=m+1}^{n} (\mathrm{j}\omega_k)^{p_k} \\
&B_n(\mathrm{j}\omega_1, \mathrm{j}\omega_2, \cdots, \mathrm{j}\omega_n) = \\
&\quad \sum_{p_1=0}^{M} \cdots \sum_{p_n=0}^{M} \sum_{1 \leqslant m \leqslant n-1} b_{n,m,p_1,\cdots,p_n} \cdot \\
&\quad \prod_{i=1}^{m} (\mathrm{j}\omega_i)^{p_i} \prod_{k=m+1}^{n} (\mathrm{j}\omega_k)^{p_k} \\
&C_n(\mathrm{j}\omega_1, \mathrm{j}\omega_2, \cdots, \mathrm{j}\omega_n) = \\
&\quad \sum_{p_1=0}^{M} \cdots \sum_{p_n=0}^{M} c_{n,p_1,\cdots,p_n} \prod_{i=1}^{n} (\mathrm{j}\omega_i)^{p_i}
\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

3　GFRF 系统健康监测仿真

考虑非线性弹簧-阻尼-质量块系统. 设质量块为 m,非线性弹簧弹力公式为 $F=k_1x+k_2x^2$,x 为弹簧形变量,阻尼器阻尼系数为 B,质量块受到的压力为 $p(t)$,有效作用面积为 A. 设弹簧在压力 $p(t)$ 作用下变形量为 $x(t)$,则系统动力学方程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2} + B\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} + k_1x(t) + k_2x^2(t) - Ap(t) = 0 \tag{17}$$

式(17)代表了一类实际工程系统,比如汽车的悬挂系统、升降机的制动器等. 在这类工程系统中,系统健康退化的主要表现形式是弹簧发生疲劳,而弹簧疲劳的典型特征是弹性减弱、塑性增强,即 k_1 减小、k_2 增大. 据此分析,可以确定式(1)中的健康向量为 $\boldsymbol{h}(t)=(k_1(t),k_2(t))^{\mathrm{T}}$. 下面考察系统 GFRF 特征与健康向量的对应关系.

由式(16)可以得到式(17)所示系统的一阶、二阶 GFRF:

$$\left.\begin{aligned}
&H_1(\mathrm{j}\omega) = \frac{d}{1 - b\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega} - c\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\omega}} \\
&H_2(\mathrm{j}\omega_1, \mathrm{j}\omega_2) = \frac{aH_1(\mathrm{j}\omega_1)H_2(\mathrm{j}\omega_2)}{1 - b\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(\omega_1+\omega_2)} - c\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2(\omega_1+\omega_2)}} \\
&a = -k_2T^2/(m + BT + k_1T^2) \\
&b = (2m + BT)/(m + BT + k_1T^2) \\
&c = -m/(m + BT + k_1T^2) \\
&d = AT^2/(m + BT + k_1T^2)
\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

使用文献[6]给出的算例参数,取 $m=1$,$B=14.5$,$A=1$. 为了考察 GFRF 特征与健康向量的对应关系,采用更小的时间步长并且增加计算点数. 按表 1 给定 (k_1,k_2) 参数对,分别计算系统的一阶、二阶 GFRF.

表 1　(k_1,k_2) 给定值表

k_1	k_2	k_1	k_2
200	20	197	23
199	21	196	24
198	22	195	25

根据式(18),编制 MATLAB 程序计算系统的一阶、二阶 GFRF. 表 2、表 3 分别列出一阶、二阶 GFRF 幅频特性曲线最大值,图 1 为 $(k_1,k_2)=(197,23)$ 时的一阶、二阶 GFRF 特性.

表 2　一阶 GFRF 幅频特性曲线最大值

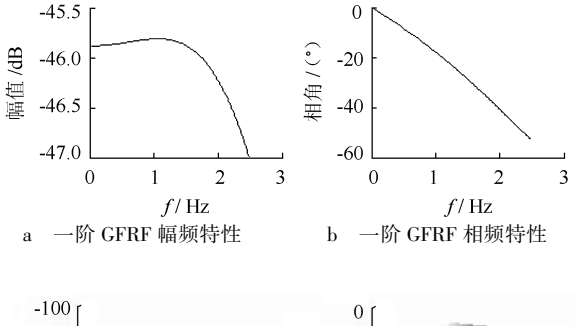
$(|\boldsymbol{H}_1(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega})|_{\max})$　　10^{-6}

k_1	$\lvert H_1(\mathrm{j}\omega)\rvert_{\max}$	k_1	$\lvert H_1(\mathrm{j}\omega)\rvert_{\max}$
200	5.0453	197	5.1183
199	5.0694	196	5.1432
198	5.0937	195	5.1682

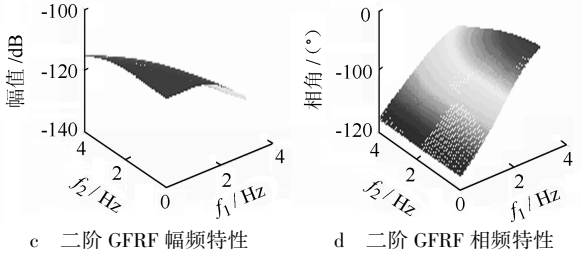
表 3　二阶 GFRF 幅频特性曲线最大值

$(|\boldsymbol{H}_2(\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}_1,\mathbf{j}\boldsymbol{\omega}_2)|_{\max})$　　10^{-6}

k_1	k_2					
	20	21	22	23	24	25
200	2.5455	2.6728	2.8001	2.9274	3.0546	3.1819
199	2.5828	2.7120	2.8411	2.9702	3.0994	3.2285
198	2.6208	2.7519	2.8829	3.0139	3.1450	3.2760
197	2.6596	2.7926	2.9256	3.0586	3.1915	3.3245
196	2.6992	2.8341	2.9691	3.1041	3.2390	3.3740
195	2.7396	2.8765	3.0135	3.1505	3.2875	3.4245



a　一阶 GFRF 幅频特性　　b　一阶 GFRF 相频特性



c　二阶 GFRF 幅频特性　　d　二阶 GFRF 相频特性

图 1　$(k_1,k_2)=(197,23)$ 时的系统一阶、二级 GFRF

4　仿真结果分析

1) 由表 2、表 3 计算结果可见,随着非线性弹

簧弹性减弱、塑性增强,一阶和二阶 GFRF 幅频特性曲线最大值将增大,说明 GFRF 方法在非线性系统故障诊断领域的有效性;另一方面,$|H_2(j\omega_1, j\omega_2)|_{max}$比$|H_1(j\omega)|_{max}$更有效地反映系统健康退化(塑性系数增大)程度.

2) 在实际应用中,往往是根据系统可测的输入输出数据,辨识出各阶 Volterra 核,然后绘制 GFRF 特征曲线,通过 GFRF 分析,确定系统健康状况[7].

3) 设计健康函数 ϕ. 工程系统健康向量的选择和健康函数 ϕ 的确立,需要由领域专家完成. 本文为了简洁地说明问题,简便地利用线性函数实现健康函数 ϕ. 假设由式(17)表示的系统出厂时健康指数 $h_i = 1$,此时系统的健康向量$\boldsymbol{h}(0) = (p_1(t), p_2(t))^{\mathrm{T}} = (k_1, k_2)^{\mathrm{T}} = (200, 20)^{\mathrm{T}}$;假设当弹性系数下降至 $k_1 = 195$、塑性系数变大至 $k_2 = 25$ 时,认为系统失效,定义此时健康指数 $h_i = 0$. 根据这两个数据点,可以获得线性健康函数 ϕ 的斜率和截距,据此编制 MATLAB 程序,绘制(k_1, k_2)与$|H_2(j\omega_1, j\omega_2)|_{max}$关系图,见图 2.

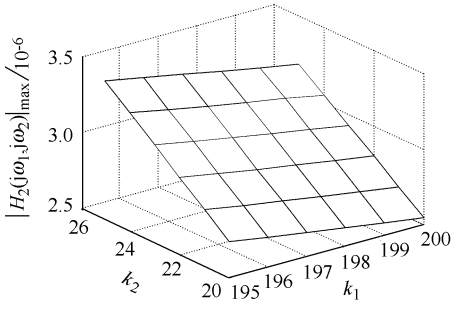


图 2 (k_1, k_2)与$|H_2(j\omega_1, j\omega_2)|_{max}$关系图

利用表 3 中数据的最大值和最小值与 $h_i = 1$ 和 $h_i = 0$ 两点的对应关系,计算出斜率为 $k = -1\,137\,656.4278$,截距为 $x_0 = 3.8959$. 则健康函数为

$$h_i = -1\,137\,656.4278x + 3.8959 \quad (19)$$

其中自变量 x 在表 3 中取值. 举例来说,假设通过试验数据获得系统的 GFRF 特性,然后由表 3 查得系统当前的健康向量$(k_1, k_2)^{\mathrm{T}} = (198, 21)^{\mathrm{T}}$,此时中间变量 $x = 2.7519 \times 10^{-6}$,代入式(19)可以计算出系统当前健康指数 $h_i = 0.7652$.

5 结束语

本文首次提出了健康向量、健康指数、健康函数、健康态变映射、健康状态映射等一系列描述工程系统健康的基本概念,并且利用 GFRF 技术研究了一类工程系统的健康监测方法. 以非线性弹簧-阻尼-质量块系统为例,用弹性系数和塑性系数构造系统健康向量,利用 Volterra 级数描述方法和 GFRF 技术进行系统健康监测. 仿真计算结果表明,本文提出的健康描述方法对于工程系统综合健康管理技术研究具有指导意义,基于 GFRF 的健康监测技术对于实现一类非线性系统的综合健康管理具有重要的参考价值.

参考文献 (References)

[1] 高占宝,李行善,梁旭. 复杂系统综合健康管理[J]. 测控技术, 2005,24(8):1-5
Gao Zhanbao, Li Xingshan, Liang Xu. Complex system integrated health management [J]. Measurement & Control Technology, 2005,24(8):1-5(in Chinese)

[2] AasengGordon B. Blueprint for an integrated vehicle health management system[C]//AIAA IEEE Dig Avionics Syst Conf Proc. Orlando: IEEE, 2001, 1: 3C11-3C111

[3] Smeulers J P M, Zeelen R. PROMIS: a generic PHM methodology applied to aircraft subsystems[C]//Big Sky. Aerospace Conference Proceedings. Piscataway: IEEE Inc, 2002: 3153-3159

[4] Gao Zhanbao, Li Xingshan, Liang Xu. Unknown input observer approach to engineering system health monitoring[C]//Qi Jiming, Cui Jianping. Conference Proceedings of the Seventh International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing: World Publishing Corpration, 2005: 432-438

[5] 闻新,张洪钺,周露. 控制系统的故障诊断和容错控制[M]. 北京:机械工业出版社,2000:6-7
Wen Xin, Zhang Hongyue, Zhou Lu. Fault diagnosis and fault-tolerant control for control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 6-7(in Chinese)

[6] 曹建福,韩崇昭,方洋旺. 非线性系统理论及应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:172-180
Cao Jianfu, Han Chongzhao, Fang Yangwang. Theory and applications of nonlinear systems[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 172-180(in Chinese)

[7] 张华君. 基于递推批量最小二乘的 Volterra 级数辨识方法[J]. 小型微型计算机系统,2004,25(12):2283-2286
Zhang Huajun. Volterra series identification method based on recursive least square algorithm[J]. Mini-Microsystems, 2004, 25(12): 2283-2286(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)