



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103091392 B

(45) 授权公告日 2015. 05. 27

(21) 申请号 201310014504. 4

(22) 申请日 2013. 01. 15

(73) 专利权人 中国人民解放军国防科学技术大学

地址 410073 湖南省长沙市开福区砚瓦池正街 47 号

(72) 发明人 杨定新 胡政 宋立军 杨拥民 胡文睿 李宝玺

(74) 专利代理机构 长沙新裕知识产权代理有限公司 43210

代理人 刘熙

(51) Int. Cl.

G01N 27/83(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102323168 A, 2012. 01. 18, 全文.

US 4745363 A, 1988. 05. 17, 全文.

EP 0533440 A1, 1993. 03. 24, 全文.

JP 特开平 7-181168 A, 1995. 07. 21, 全文.

CN 101923070 A, 2010. 12. 22, 全文.

Glodež

S et al..A computational model for determination of service life of gears. 《International Journal of Fatigue》.2002, 第 24 卷 (第 10 期), 第 1013-1020 页.

乐晓斌. 齿轮抗弯曲疲劳可靠度预测的方法. 《南京航空航天大学学报》. 1995, 第 27 卷 (第 2 期), 第 275-279 页.

审查员 唐仕军

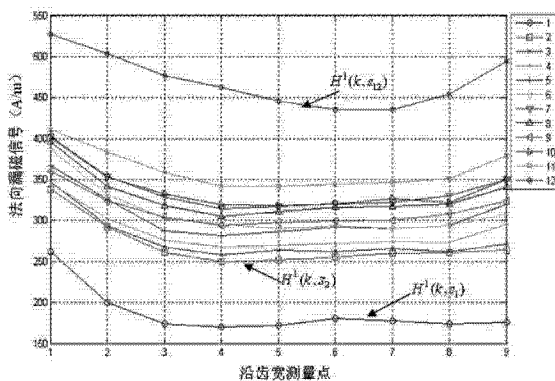
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于漏磁信号测量的齿轮弯曲疲劳裂纹损伤检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于漏磁信号测量的齿轮弯曲疲劳裂纹损伤检测方法,包括以下步骤:1)将齿轮,在额定负载下经过 10 万至 30 万次载荷循环以后,测量齿轮各轮齿齿顶表面的法向漏磁信号;2)根据法向漏磁信号计算得到其差分值;3)根据法向漏磁信号计算得到其平均值等;根据①齿顶法向漏磁信号平均值会比正常状态显著增大;②差分曲线形状会与正常状态的差分曲线形状产生明显差异两个条件同时满足作为齿轮轮齿萌生弯曲疲劳裂纹损伤的检测依据。本方法对齿轮轮齿弯曲疲劳状态的判断更准确,并且操作简便,适合于各种尺寸的齿轮轮齿弯曲疲劳裂纹损伤早期检测。



CN 103091392 B

1. 一种基于漏磁信号测量的齿轮弯曲疲劳裂纹损伤检测方法,其特征在于包括以下步骤:

1) 将处于正常状态尚未发生轮齿弯曲疲劳裂纹损伤的齿轮,在额定负载下经过 10 万至 30 万次载荷循环以后,其状态用 s_1 来表示,沿轮齿齿宽方向等间隔测量齿轮各轮齿齿顶表面的法向漏磁信号 $H^i(k, s_1)$, $i=1, 2, \dots, M$ $k=1, 2, \dots, N$, 其中 i 表示齿轮轮齿序号, M 表示齿轮的轮齿数, k 表示沿轮齿齿宽方向齿顶法向漏磁信号测量点序号, N 表示总的测量点数,上述轮齿齿顶法向漏磁信号是指垂直于轮齿齿顶表面的漏磁信号;

2) 根据测量得到的各齿顶法向漏磁信号 $H^i(k, s_1)$, 由公式 (1) 计算得到各齿顶法向漏磁信号的差分值 $\Delta H^i(k, s_1)$, $k=1, 2, \dots, N-1$

$$\Delta H^i(k, s_1) = H^i(k+1, s_1) - H^i(k, s_1), \quad k=1, 2, \dots, N-1 \quad (1);$$

3) 根据测量得到的各齿顶法向漏磁信号 $H^i(k, s_1)$, 由公式 (2) 计算得到各齿顶法向漏磁信号的平均值 $\bar{H}^i(s_1)$:

$$\bar{H}^i(s_1) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N H^i(k, s_1), \quad i=1, 2, \dots, M \quad k=1, 2, \dots, N \quad (2);$$

4) 让所述齿轮在额定负载作用下继续运行 10 万至 30 万次载荷循环以后, 齿轮状态记作 s_2 , 根据步骤 1) 一步骤 3) 测量得 $H^i(k, s_2)$, 计算得到 $\bar{H}^i(s_2)$ 和 $\Delta H^i(k, s_2)$, 其中 $i=1, 2, \dots, M$, 继续重复步骤 1) 一步骤 3), 测量得到 $H^i(k, s_j)$, 计算得到 $\bar{H}^i(s_j)$ 和 $\Delta H^i(k, s_j)$, 其中 $s_j = s_3, s_4, \dots, s_j$ 表示随着齿轮在负载作用下载荷循环次数不断增长时, 齿轮所处的不同状态;

5) 针对所述齿轮的某一轮齿 i , 根据 $\bar{H}^i(s_j)$, 绘制 $\bar{H}^i(s_j) - s_j$ 法向漏磁信号的平均值曲线;

6) 针对所述齿轮的每一轮齿 i , 根据每一状态 s_j 所对应的 $\Delta H^i(k, s_j)$ 绘制一条 $\Delta H^i(k, s_j) - k$ 差分曲线, 其中 $k=1, 2, \dots, N-1$, 轮齿 i 不同状态的差分曲线绘制在同一幅图中;

7) 当所述齿轮轮齿 i 萌生出弯曲疲劳裂纹损伤时, 记此时的齿轮状态为 s_D , 则有: ① 齿顶法向漏磁信号平均值 $\bar{H}^i(s_D)$ 会比正常状态显著增大; ② $\Delta H^i(k, s_D)$ 差分曲线形状会与正常状态的 $\Delta H^i(k, s_j)$ 差分曲线形状产生明显差异, 以①和②两个条件同时满足作为齿轮轮齿 i 萌生弯曲疲劳裂纹损伤的检测依据。

一种基于漏磁信号测量的齿轮弯曲疲劳裂纹损伤检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械无损检测、状态监控技术领域,具体涉及一种基于漏磁信号测量的齿轮弯曲疲劳裂纹损伤检测方法。

背景技术

[0002] 磁记忆检测技术是通过测量铁磁性金属构件表面自身的漏磁信号来判断金属构件的应力集中区和微裂纹损伤的一种无损检测方法。其原理是:铁磁性金属材料在载荷的作用下,材料内部的不连续部位(如形状、结构或缺陷)会造成应力的不均匀分布,出现应力集中。同时,由于金属内部存在着多种内耗效应(如粘弹性内耗、位错内耗),造成动态载荷消除后,加载时形成的应力集中区得以保留,并具有相当高的应力能。为抵消应力集中区的应力能,在该区域由于磁机械效应作用引发的磁畴组织的重新取向排列会保留下来,形成磁极,并在构件表面产生漏磁场。磁记忆检测技术能检测出可能诱发损伤或破坏的应力集中部位,为设备的早期诊断提供了依据,在机械、航空、铁路、石化等领域有着广泛的应用。

[0003] 齿轮是构成机械设备的重要零件,大型机械设备的齿轮承载扭矩较大,在长时间连续工作的环境下,齿轮的轮齿极易萌生裂纹、齿面点蚀和胶合等失效损伤,特别是轮齿弯曲疲劳裂纹损伤,如果不能在裂纹损伤的萌生期及早检测出来,就可能断齿事故的发生,造成设备损坏,带来重大的损失。齿轮常规的检测方法是通过振动与噪声检测,这种方法可以在线检测,但通常只有在宏观裂纹出现以后才能检测出来,往往很难做到弯曲疲劳裂纹损伤的早期检测。

[0004] 采用磁记忆方法检测齿轮损伤的应用还很少,其中发明专利 201010207147.X 提出通过设计与被测齿轮的轮齿齿形相啮合的检测装置来测量轮齿齿形表面的漏磁信号,以此来检测齿轮的损伤。但该方法没有综合考虑齿轮全寿命工作过程中漏磁信号的变化规律,没有综合考虑齿轮工作过程中漏磁信号是多种原因综合的结果,而且该方法通常只适用于大型齿轮,对于小尺寸齿轮,检测装置加工困难,实际应用中可操作性不强。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种基于漏磁信号测量的齿轮弯曲疲劳裂纹损伤检测方法,该方法对齿轮轮齿弯曲疲劳状态的判断更准确,并且操作简便,适合于各种尺寸的齿轮轮齿弯曲疲劳裂纹损伤早期检测。

[0006] 本发明提供的基于漏磁信号测量的齿轮弯曲疲劳裂纹损伤检测方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 将处于正常状态尚未发生轮齿弯曲疲劳裂纹损伤的齿轮,在额定负载下经过 10 万至 30 万次载荷循环以后,其状态用 s_1 来表示,沿轮齿齿宽方向等间隔测量齿轮各轮齿齿顶表面的法向漏磁信号 $H^i(k, s_1)$, $i = 1, 2, \dots, M$ $k = 1, 2, \dots, N$, 其中 i 表示齿轮轮齿序号, M 表示齿轮的轮齿数, k 表示沿轮齿齿宽方向齿顶法向漏磁信号测量点序号, N 表示总的

测量点数,上述轮齿齿顶法向漏磁信号是指垂直于轮齿齿顶表面的漏磁信号;

[0008] 2) 根据测量得到的各齿顶法向漏磁信号 $H^i(k, s_1)$, 由公式 (1) 计算得到各齿顶法向漏磁信号的差分值 $\Delta H^i(k, s_1)$, $k = 1, 2, \dots, N-1$

[0009] $\Delta H^i(k, s_1) = H^i(k+1, s_1) - H^i(k, s_1)$, $k = 1, 2, \dots, N-1$ (1);

[0010] 3) 根据测量得到的各齿顶法向漏磁信号 $H^i(k, s_1)$, 由公式 (2) 计算得到各齿顶法向漏磁信号的平均值 $\bar{H}^i(s_1)$:

[0011] $\bar{H}^i(s_1) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N H^i(k, s_1)$, $i = 1, 2, \dots, M$ $k = 1, 2, \dots, N$ (2);

[0012] 4) 让所述齿轮在额定负载作用下继续运行 10 万至 30 万次载荷循环以后, 齿轮状态记作 s_2 , 根据步骤 1) 一步骤 3) 测量得 $H^i(k, s_2)$, 计算得到 $\bar{H}^i(s_2)$ 和 $\Delta H^i(k, s_2)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, M$, 继续重复步骤 1) 一步骤 3), 测量得到 $H^i(k, s_j)$, 计算得到 $\bar{H}^i(s_j)$ 和 $\Delta H^i(k, s_j)$, 其中 $s_j = s_3, s_4, \dots, s_j$ 表示随着齿轮在负载作用下载荷循环次数不断增长时, 齿轮所处的不同状态;

[0013] 5) 针对所述齿轮的某一轮齿 i , 根据 $\bar{H}^i(s_j)$, 绘制 $\bar{H}^i(s_j) - s_j$ 法向漏磁信号的平均值曲线;

[0014] 6) 针对所述齿轮的每一轮齿 i , 根据每一状态 s_j 所对应的 $\Delta H^i(k, s_j)$ 绘制一条 $\Delta H^i(k, s_j) - k$ 差分曲线, 其中 $k = 1, 2, \dots, N-1$, 轮齿 i 不同状态的差分曲线绘制在同一幅图中;

[0015] 7) 当所述齿轮轮齿 i 萌生出弯曲疲劳裂纹损伤时, 记此时的齿轮状态为 s_D , 则有: ①齿顶法向漏磁信号平均值 $\bar{H}^i(s_D)$ 会比正常状态显著增大; ② $\Delta H^i(k, s_D)$ 差分曲线形状会与正常状态的 $\Delta H^i(k, s_j)$ 差分曲线形状产生明显差异, 以①和②两个条件同时满足作为齿轮轮齿 i 萌生出弯曲疲劳裂纹损伤的检测依据。

[0016] 本发明的优点是: 利用齿轮全寿命工作过程漏磁信号的变化信息来判断齿轮轮齿的弯曲疲劳裂纹损伤; 所测量的轮齿齿顶漏磁信号包含了磁记忆效应所产生的漏磁信号和齿轮运行过程中所产生的漏磁信号等信息, 由于测量的漏磁信号更全面, 因此对齿轮轮齿弯曲疲劳状态的判断也更准确。测量的漏磁信号是垂直于轮齿齿顶面沿齿宽方向的漏磁信号, 测量方便、操作简洁, 而且能够适用于不同模数、不同尺寸的齿轮。采用齿顶法向漏磁信号平均值和差分曲线反映齿轮轮齿弯曲疲劳损伤程度, 可为齿轮轮齿弯曲疲劳裂纹损伤检测量化打下基础。

[0017] 为了更好地说明本发明的目的和优点, 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明。

附图说明

[0018] 图 1 是不同阶段 1 号试验轮齿的齿顶法向漏磁信号 $\Delta H^i(k, s_j)$ 分布图。

[0019] 图 2 是 1 号试验轮齿的 $\bar{H}^i(s_j) - s_j$ 曲线图。

[0020] 图 3 是不同阶段 1 号试验轮齿的 $\Delta H^i(k, s_j) - k$ 曲线。

具体实施方式

[0021] 利用高频疲劳试验机对齿轮轮齿弯曲疲劳损伤进行全寿命疲劳试验。试验齿轮模数为 4.1, 齿数 $M = 18$, 压力角为 22.5° , 齿轮材料的抗拉强度为 981MPa, 上屈服强度为 721MPa, 下屈服强度为 694MPa, 漏磁信号测量点总点数 $N = 9$, 以该齿为试验齿, 令 $i = 1$, 记为 1 号试验齿。

[0022] 齿轮疲劳试验采用脉动加载试验法, 试验齿轮始终处于静止状态, 而通过夹具固定住齿轮, 疲劳试验机的压头夹住齿轮的一对齿作脉动循环加载, 从而使轮齿产生疲劳, 每加载一定次数的循环后将齿轮卸载, 利用磁记忆信号检测仪, 采用逐点测量的方法对加载齿齿顶的法向漏磁信号进行离线测量, 完成一组试验, 测量完毕后继续加载, 如此循环直到齿轮出现宏观弯曲疲劳裂纹, 具体步骤如下:

[0023] 1) 试验齿轮为新齿轮, 所加载的疲劳载荷为静载 54kN、动载 51kN, 均在齿轮的正常承受范围以内, 进行 10 万次疲劳循环以后, 记此时齿轮的状态为 s_1 , 卸载后沿轮齿齿宽方向等间隔测量齿轮各轮齿齿顶表面的法向漏磁信号 $H^i(k, s_1)$, $i = 1, 2, \dots, M$ $k = 1, 2, \dots, N$, 其中 i 表示齿轮轮齿序号, M 表示齿轮的轮齿数, k 表示沿轮齿齿宽方向齿顶法向漏磁信号测量点序号, N 表示总的测量点数, 上述轮齿齿顶法向漏磁信号是指垂直于轮齿齿顶表面的漏磁信号, 其中测量得到 1 号试验轮齿沿齿宽方向齿顶的法向漏磁信号 $H^1(k, s_1)$;

[0024] 2) 根据测量得到的 $H^1(k, s_1)$, 依据公式 (1) 计算得到 1 号试验轮齿的齿顶法向漏磁信号的差分值 $\Delta H^1(k, s_1)$:

$$[0025] \quad \Delta H^1(k, s_1) = H^1(k+1, s_1) - H^1(k, s_1), \quad i = 1, k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (1);$$

[0026] 3) 根据测量得到的 $H^1(k, s_1)$, 依据公式 (2) 计算得到 1 号试验轮齿的齿顶法向漏磁信号的平均值 $\bar{H}^1(s_1)$:

$$[0027] \quad \bar{H}^1(s_1) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N H^1(k, s_1), \quad i = 1, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2);$$

[0028] 4) 继续对齿轮加载疲劳载荷, 其中静载 54kN、动载 51kN, 再进行 10 万次疲劳循环, 齿轮状态记作 s_2 , 根据步骤 1) 一步骤 3) 测量得到 $H^1(k, s_2)$, 计算得到 $\Delta H^1(k, s_2)$ 和 $\bar{H}^1(s_2)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, M$, 继续试验, 继续重复步骤 1) 一步骤 3), 测量得 $H^1(k, s_j)$, 计算得到 $\Delta H^1(k, s_j)$ 和 $\bar{H}^1(s_j)$, 其中 $s_j = s_3, s_4, \dots, s_{12}$, 整个疲劳试验过程完整进行了 12 组试验, 每组试验做完后, 试验轮齿进入的状态用 s_j 表示, 其中 j 为试验组号, 每一组试验所加载的疲劳载荷均是静载 54kN、动载 51kN, 疲劳循环加载过程如表 1 所示,

[0029] 表 1 疲劳循环加载过程

[0030]

试验组号 j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
循环次数 (万次)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	30	28

[0031] 图 1 为 1 号试验轮齿每组试验完毕测量得到的齿顶法向漏磁信号分布 $H^1(k, s_i)$,

共有 12 组测量值,不同试验组号的曲线用不同的图形进行标记;

[0032] 5) 针对齿轮的 1 号试验轮齿,绘制 $\bar{H}^1(s_j)-s_j$ 法向漏磁信号的平均值曲线,曲线随着 j 的增加不断更新,见图 2,其中 s_j 对应不同的疲劳循环次数;

[0033] 6) 针对齿轮 1 号试验轮齿,根据每一状态 s_j 所对应的 $\Delta H^1(k, s_j)$ 绘制一条 $\Delta H^1(k, s_j)-k$ 差分曲线,1 号试验轮齿不同状态的差分曲线绘制在图 3 中,不同状态(试验组号)的曲线用不同的图形进行标记;

[0034] 7) 当所述齿轮轮齿 i 萌生出弯曲疲劳裂纹损伤时,记此时的齿轮状态为 s_D ,则有:

①齿顶法向漏磁信号平均值 $\bar{H}^1(s_D)$ 会比正常状态显著增大;② $\Delta H^1(k, s_D)$ 差分曲线形状会与正常状态的 $\Delta H^1(k, s_j)$ 差分曲线形状产生明显差异,由图 2 可见, $\bar{H}^1(s_j)$ 值的变化特征可分为 3 个阶段,第一阶段为快速增长阶段,疲劳循环次数在 40 万次以下,新的齿轮轮齿在应力作用下,会显著增长,符合齿轮弯曲裂纹损伤检测的条件①,但由图 3 可知,此时 $\Delta H^1(k, s_j)-k$ 曲线基本重叠在一起,曲线形状没有明显差异,不符合齿轮弯曲裂纹损伤检测的条件②,第二阶段为试件进入稳定工作阶段,疲劳循环次数在 40 万次到 130 万次左右,图 2 中齿顶漏磁场缓慢增长 $\bar{H}^1(s_j)$ 增加缓慢,同时图 3 中 $\Delta H^1(k, s_j)-k$ 曲线也没有明显差异;第三阶段为裂纹损伤萌生阶段,疲劳循环次数在 130 万次以上,此时图 2 中 $\bar{H}^1(s_j)$ 漏磁信号值急剧增大,而 $\Delta H^1(k, s_j)-k$ 曲线则与正常状态产生明显差异,见图 3 中虚线,符合齿轮弯曲裂纹损伤的两个检测条件①和②,由此可判断轮齿已萌生出弯曲疲劳裂纹损伤,但还不是宏观裂纹,通过继续加载不到 2000 次,疲劳试验机已检测到明显的频率下降,试验轮齿齿根处沿齿宽方向产生了肉眼可见的宏观疲劳裂纹损伤。以上齿轮轮齿弯曲疲劳试验的检测结果表明了本发明方法的有效性。

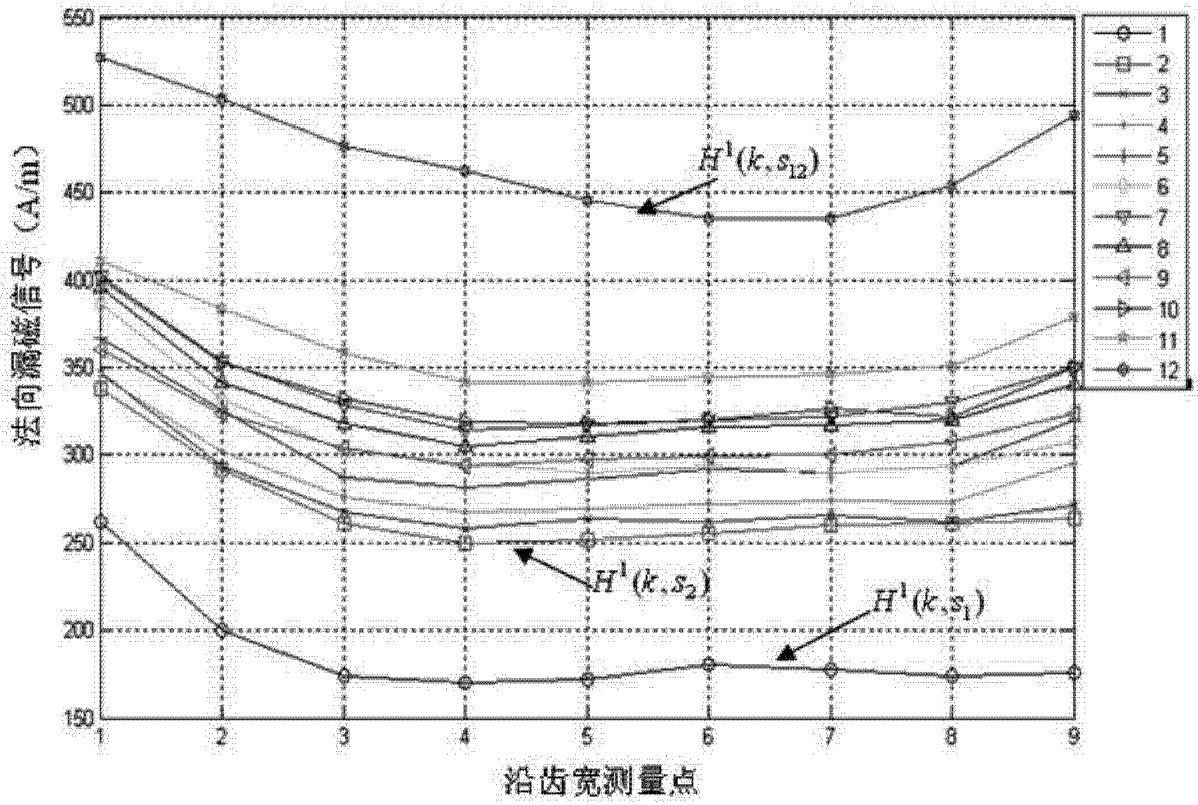


图 1

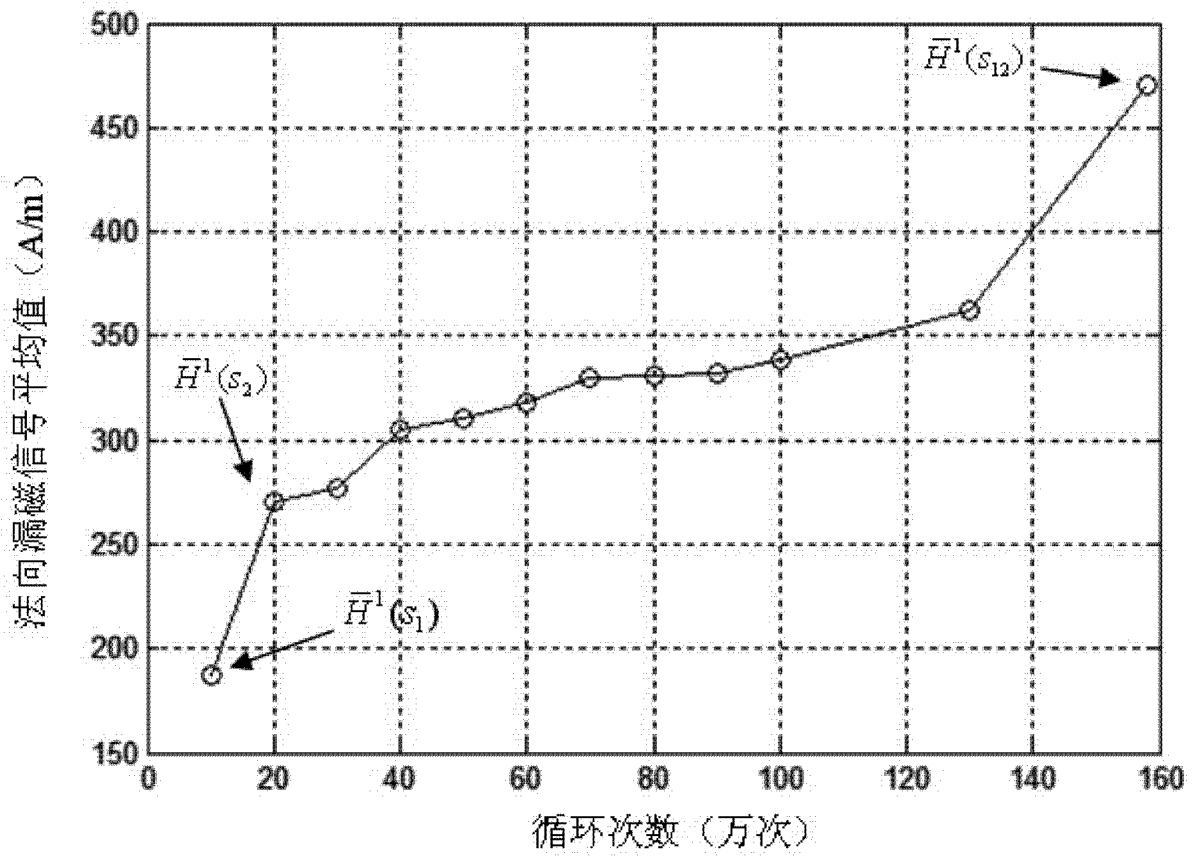


图 2

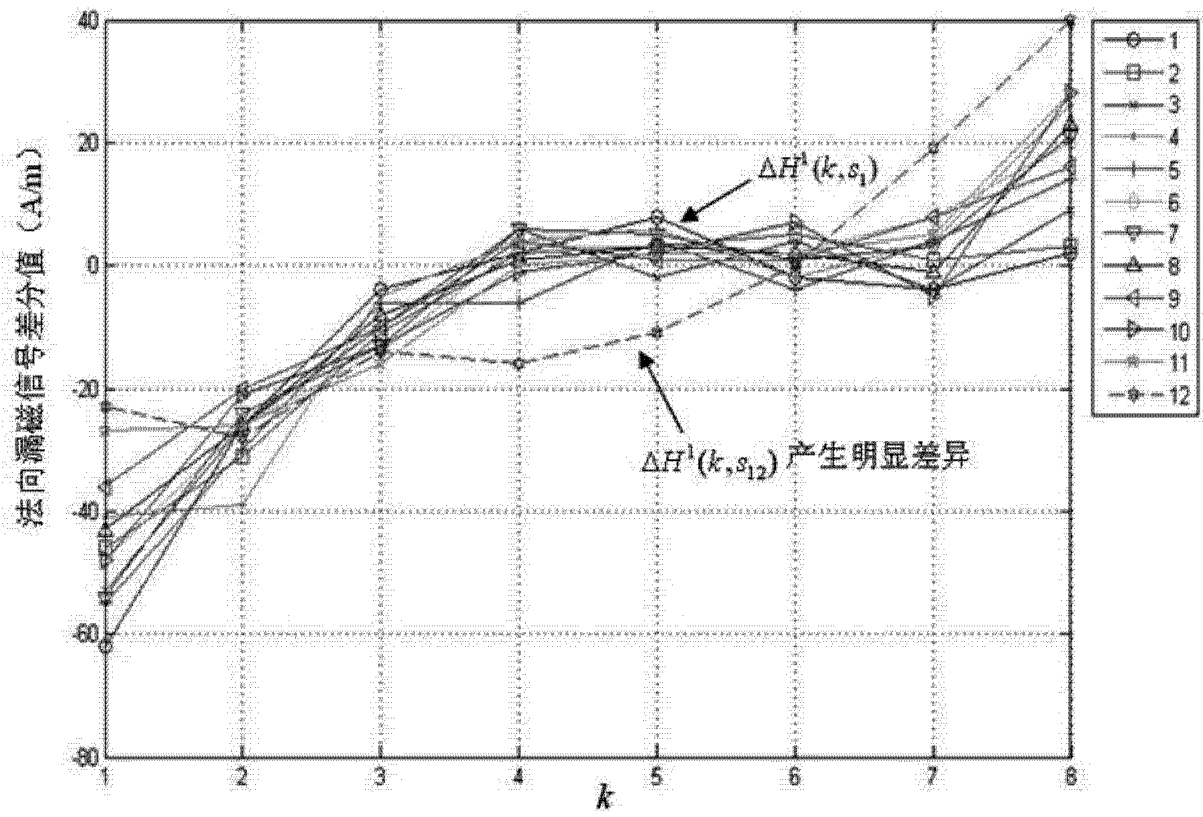


图 3