



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103678922 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 26

(21) 申请号 201310697981. 5

(22) 申请日 2013. 12. 18

(71) 申请人 北京科技大学

地址 100083 北京市海淀区学院路 30 号

(72) 发明人 赵志毅 陈凌峰 王宝明 黄赛

郑攀峰 赵东红 薛润东

(74) 专利代理机构 北京金智普华知识产权代理

有限公司 11401

代理人 皋吉甫

(51) Int. Cl.

G06F 19/00 (2011. 01)

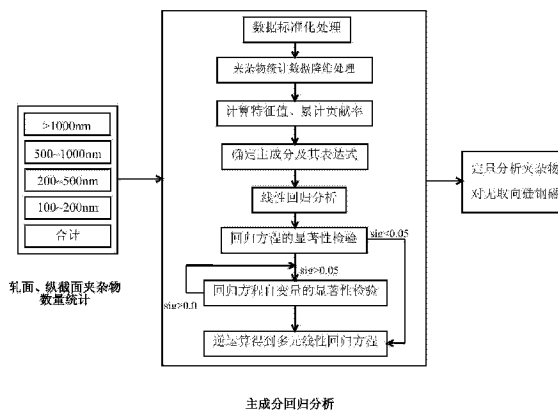
权利要求书2页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称

基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法

(57) 摘要

本发明是基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法。该方法包括：统计无取向硅钢中不同尺寸区间的夹杂物数量；所有数据的标准化处理；夹杂物统计数据的降维处理；计算特征值，确定主成分的数量和主成分表达式；作回归分析并对回归方程及自变量作显著性检验；利用标准差标准化法的逆运算将回归方程转换成各尺寸区间的夹杂物数量及夹杂物总量与无取向硅钢磁性能间的多元线性关系。本发明能够使错综复杂的变量以相同的权重参加运算，消除了变量间相关性带来的影响，定量的分析夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响，并能直观的判别显著影响无取向硅钢磁性能的夹杂物尺寸区间，为实际生产更高磁感、低铁损电工钢产品提供方向性的指导。



1. 一种基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,其特征在于,所述方法包括下列步骤:

1.1 观察并统计无取向硅钢中的夹杂物数量,获取不同尺寸区间的夹杂物数量统计数据;

1.2 利用标准差标准化法对无取向硅钢的磁性能(铁损 $P_{1.5/50}$ 和磁感 B_{50})及统计的夹杂物数据进行标准化处理,使各数值以相同的权重参加运算分析;

1.3 对标准化后的夹杂物统计数据降维处理:将 n 个相关变量组合成 n 个独立变量,变换前后保持变量的方差和不变,选择前 m 个独立变量的作用代替原 n 个相关变量的作用,其中 $m < n$;

1.4 计算特征方程中所有特征值,根据特征值及累积贡献率确定主成分的数量,再计算主成分的成分矩阵及单位正交特征向量,得到主成分表达式;

1.5 分别以标准化后的铁损、磁感值作为因变量,以提取的主成分为自变量作回归分析,得到回归方程并对其作线性关系的显著性检验,当回归方程为多元,且其存在不显著自变量时,再对回归方程中的自变量作显著性检验,直至各自变量的差异性显著检验值 sig 低于给定的显著性水平 α , α 取 0.05;

1.6 利用标准差标准化法的逆变换运算将线性回归方程转换成关于原 n 个相关变量的多元线性方程;

1.7 根据上述方法得到的多元线性方程从定量的角度分析无取向硅钢磁性能与各尺寸区间夹杂物的关系,判别显著影响无取向硅钢磁性的夹杂物尺寸区间。

2. 根据权利要求 1 所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,其特征在于,所述步骤 1.1 中试验试样的观察面分为轧面和纵截面,夹杂物统计分 $>1000\text{nm}$ 、 $500 \sim 1000\text{nm}$ 、 $200 \sim 500\text{nm}$ 、 $100 \sim 200\text{nm}$ 四个尺寸区间。

3. 根据权利要求 1 所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,其特征在于,所述步骤 1.1 中对于尺寸 $>1000\text{nm}$ 的夹杂物随机选择 5000 ~ 10000 倍的视场进行观察, $100 \sim 1000\text{nm}$ 的夹杂物在 10000 ~ 20000 倍的视场下随机统计。

4. 根据权利要求 1 ~ 3 其中之一所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,其特征在于,所述步骤 1.2 中数据的标准差标准化法如下:

$$x_i^* = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (1)$$

其中, x_i^* 为标准化后的数据, x_i 为变量 x 的第 i 个观测值, $\bar{x}$ 为变量 x 的平均值, s 为标准差。

5. 根据权利要求 4 所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,其特征在于,所述步骤 1.4 中所提取的主成分数量所满足的条件是:各成分特征值大于 1 且它们的累积贡献率大于 80%。

6. 根据权利要求 5 所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,其特征在于,所述步骤 1.4 中计算单位正交特征向量公式如下:

$$t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ip}]^T = l_i / \sqrt{\lambda_i} = [l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{ip}]^T / \sqrt{\lambda_i} \quad (2)$$

其中, i 表示主成分数量, p 表示自变量个数, l_i 表示主成分向量, λ_i 表示第 i 个主成分的特征值。得到主成分表达式 $Z_i = t_i^T \cdot [x_1^*, x_2^*, \dots, x_p^*]^T$ 。

7. 根据权利要求6所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法, 其特征在于, 所述步骤1.5中多元回归方程线性关系的显著性检验利用统计量 F 来实现, 涉及的参数的计算方法统计于方差分析表1中, 表中数据除 N 外均指标准化后的数据;

表1 方差分析表

	平方和	自由度	均方和	F
回归	$S_{\text{回}} = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	p	$S_{\text{回}}/p$	
剩余	$S_{\text{剩}} = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$	$N-p-1$	$S_{\text{剩}}/(N-p-1)$	$\frac{S_{\text{回}}/p}{S_{\text{剩}}/(N-p-1)}$
总计	$S_{\text{总}} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$	$N-1$	—	

其中, $S_{\text{回}}$ 表示因变量对各自变量作线性回归的回归平方和, $S_{\text{剩}}$ 表示残差平方和, $S_{\text{总}}$ 表示总离差平方和, $\hat{y}_i$ 为由非标准化系数构成回归方程计算出的回归值, 即 y_i 的回归拟合值, $\bar{y}$ 为所有因变量 y_i 的平均值, N 为统计的样品数。

令 $F_{\text{sig}}(p, N-p-1) = F$, 即当 sig 小于 0.05 时, 差异显著, 所检验的回归方程呈线性是可靠的, 反之, 当 sig 大于 0.05 时, 差异不显著, 则所检验的回归方程的线性关系是不可靠的, 需要对该回归方程的系数继续进行显著性检验。

8. 根据权利要求7所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法, 其特征在于, 所述步骤1.5中, 当多元回归方程中有不显著变量时, 需对各自变量作显著性检验, 采用剔除多余变量的后退法, 剔除最大的 sig 值所对应的 x_i , 或剔除最小 $|t|$ 值对应的自变量, 重新求出相应的回归方程, 再对 sig 值或 $|t|$ 值进行检验, 直至 sig 值小于 0.05 为止, 但由于回归系数间存在相关关系, 故当有几个变量不显著时, 不能同时将这些变量一起剔除, 只能每次剔除一个最不显著的变量。

9. 根据权利要求8所述的基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法, 其特征在于, 通过比较得到的多元线性回归方程中各自变量的系数, 从定量角度分析夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响, 直观的判别显著影响无取向硅钢磁性能的夹杂物尺寸区间。

基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法

技术领域

[0001] 本发明涉及无取向硅钢性能的控制技术领域,特别涉及一种基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着电力、电子和军事行业的不断进步,机电工业、电力工业及仪器仪表工业等各个领域的产品正朝高效率化、高精度化、小型化方向发展,而冷轧无取向硅钢作为广泛用于制造电机、发电机、稳流器等所需的一种重要软磁材料,要求其具有低铁损、高磁感的优异磁性能,以达到机电、电讯工业等产品减轻重量、减小体积、节能节材等目的。

[0003] 夹杂物是影响无取向硅钢磁性能的重要因素,尤其是夹杂物尺寸与磁畴相近时,其影响最大,分析夹杂物总量及各尺寸区间的夹杂物数量对无取向硅钢磁性能的影响,并找出对电工钢磁性能影响最大的夹杂物尺寸区间,能够为实际生产提供指导,以实现更高磁感、低铁损电工钢产品生产工艺的优化和改进。

[0004] 目前,国内外对无取向硅钢中夹杂物的统计分析已有大量的研究,但只是定性的统计分析了不同尺寸夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响,初步考查了夹杂物与磁性能的关系,未能从定量的角度找出无取向硅钢磁性能与各尺寸区间夹杂物的关系,难以确定显著影响磁性的夹杂物尺寸区间,且国内外关于利用数学方法建立无取向硅钢磁性能与多个尺寸区间夹杂物的作用关系的研究并不多见。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,运用主成分回归分析法,对试验统计的夹杂物数量进行分析,建立夹杂物总量及各尺寸区间的夹杂物数量与无取向硅钢磁性能间的多元线性关系,并对其进行显著性检验,从而找出对电工钢磁性能影响最大的夹杂物尺寸区间,为实际生产更高磁感、低铁损电工钢产品提供方向性的指导。

[0006] 为达到上述目的,本发明采用的技术方案是:

[0007] 一种基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法,包括下列步骤:

[0008] (1) 观察并统计无取向硅钢中的夹杂物数量,获取不同尺寸区间的夹杂物数量统计数据;

[0009] (2) 利用标准差标准化法对无取向硅钢的磁性能(铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{50})及统计的夹杂物数据进行标准化处理,使各数值以相同的权重参加运算分析;

[0010] (3) 对标准化后的夹杂物统计数据降维处理:将 n 个相关变量组合成 n 个独立变量,变换前后保持变量的方差和不变,选择前 m ($m < n$) 个独立变量的作用代替原 n 个相关变量的作用;

[0011] (4) 计算特征方程中所有特征值,根据特征值及累积贡献率确定主成分的数量,再计算主成分的成分矩阵及单位正交特征向量,得到主成分表达式;

[0012] (5) 分别以标准化后的铁损、磁感值作为因变量,以提取的主成分为自变量作回归分析,得到回归方程并对其作线性关系的显著性检验,当回归方程为多元,且其存在不显著自变量时,再对回归方程中的自变量作显著性检验,直至各自变量的差异性显著检验值 sig 低于给定的显著性水平 α ,一般 α 取 0.05;

[0013] (6) 利用标准差标准化法的逆变换运算将线性回归方程转换成关于原 n 个相关变量的多元线性方程;

[0014] (7) 根据上述方法得到的多元线性方程从定量的角度分析无取向硅钢磁性能与各尺寸区间夹杂物的关系,判别显著影响无取向硅钢磁性的夹杂物尺寸区间。

[0015] 进一步地,所述步骤(1)中试验试样的观察面分为轧面和纵截面,夹杂物统计分 $>1000\text{nm}$ 、 $500 \sim 1000\text{nm}$ 、 $200 \sim 500\text{nm}$ 、 $100 \sim 200\text{nm}$ 四个尺寸区间。

[0016] 进一步地,所述步骤(1)中对于尺寸 $>1000\text{nm}$ 的夹杂物随机选择 5000 ~ 10000 倍的视场进行观察,100 ~ 1000nm 的夹杂物在 10000 ~ 20000 倍的视场下随机统计。

[0017] 进一步地,所述步骤(2)中数据的标准差标准化法如下:

$$x_i^* = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (1)$$

其中, x_i^* 为标准化后的数据, x_i 为变量 x 的第 i 个观测值, $\bar{x}$ 为变量 x 的平均值, s 为标准差。

[0018] 进一步地,所述步骤(4)中所提取的主成分数量所满足的条件是:各成分特征值大于 1 且它们的累积贡献率大于 80%。

[0019] 进一步地,所述步骤(4)中计算单位正交特征向量公式如下:

$$t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ip}]^T = l_i / \sqrt{\lambda_i} = [l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{ip}]^T / \sqrt{\lambda_i} \quad (2)$$

其中, i 表示主成分数量, p 表示自变量的个数, l_i 表示主成分向量, λ_i 表示第 i 个主成分的特征值。得到主成分表达式 $Z_i = t_i^T \cdot [x_1^*, x_2^*, \dots, x_p^*]^T$ 。

[0020] 进一步地,所述步骤(5)中多元回归方程线性关系的显著性检验利用统计量 F 来实现,涉及的参数的计算方法统计于方差分析表中,如表 1 所示,表中数据除 N 外均指标准化后的数据。

表 1 方差分析表

	平方和	自由度	均方和	F
回归	$S_{\text{回}} = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	p	$S_{\text{回}}/p$	
剩余	$S_{\text{剩}} = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$	N-p-1	$S_{\text{剩}}/(N-p-1)$	$\frac{S_{\text{回}}/p}{S_{\text{剩}}/(N-p-1)}$
总计	$S_{\text{总}} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$	N-1	—	

总离差平方和, $\hat{y}_i$ 为由非标准化系数构成回归方程计算出的回归值, 即 y_i 的回归拟合值, $\bar{y}$ 为所有因变量 y_i 的平均值, N 为统计的样品数。

令 $F_{\text{sig}}(p, N-p-1) = F$, 即当 sig 小于 0.05 时, 差异显著, 所检验的回归方程呈线性是可靠的, 反之, 当 sig 大于 0.05 时, 差异不显著, 则所检验的回归方程呈线性是不可靠的, 需要对该回归方程的系数继续进行显著性检验。

[0021] 进一步地, 所述步骤 (5) 中多元回归方程中的自变量作显著性检验时, 需要采用一种剔除多余变量的方法(后退法), 剔除最大的 sig 值所对应的 x_i , 或剔除最小 $|t|$ 值对应的自变量, 重新求出相应的回归方程, 再对 sig 值或 $|t|$ 值进行检验, 直至 sig 值小于 0.05 为止, 但由于回归系数间存在相关关系, 故当有几个变量不显著时, 不能同时将这些变量一起剔除, 只能每次剔除一个最不显著的变量。

[0022] 本发明的技术优点及效果如下:

[0023] 1. 主成分回归分析法能够有效地对多变量问题进行分析, 使各变量以相同的权重参加运算, 消除了变量间相关性带来的影响, 简化了回归方程的结构, 并且对大量的原始数据进行主成分回归分析, 能够从错综复杂的影响因素中获取主要的信息来定量分析变量间的多元线性关系。

[0024] 2. 利用本发明的方法分析夹杂物总量及各尺寸区间的夹杂物数量对无取向硅钢磁性能的影响时, 能可靠的得到它们之间的多元线性关系, 通过比较得到的多元线性回归方程中各自变量的系数, 能够从定量角度来分析夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响, 并能直观的判别显著影响无取向硅钢磁性能的夹杂物尺寸区间。

附图说明

[0025] 图 1 为本发明基于主成分回归分析的夹杂物影响无取向硅钢磁性能的分析方法流程示意图。

[0026] 图 2 为本发明实施例的夹杂物总量及各尺寸区间夹杂物数量对无取向硅钢铁损影响程度的柱状图。

[0027] 图 3 为本发明实施例的夹杂物总量及各尺寸区间夹杂物数量对无取向硅钢磁感影响程度的柱状图。

具体实施方式

[0028] 下面结合实施例和附图对本发明作进一步说明。

[0029] 实施例采用某钢厂提供的经连铸、热轧(2.6mm厚)、冷轧(0.5mm厚)、连退及表面涂层后的无取向硅钢成品检测试样,选取10组磁性能各不相同的试样进行研究,各组试样的磁性能见表2。

[0030] 表2 实施例试样的磁性能

[0031]

试样编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	5.557	5.45	5.917	5.474	5.769	5.786	6.216	6.469	5.6801	5.1888
磁感 B_{50} (T)	1.7384	1.758	1.7322	1.7625	1.7442	1.7649	1.7396	1.7272	1.7321	1.7522

[0032] 利用 ZEISSEVO18 型扫描显微镜、ZEISSULTRA55 场发射扫描电镜及能谱仪随机、连续选择视场,观察并统计无取向硅钢中的夹杂物数量,试样的观察面分为轧面和纵截面,夹杂物统计分 >1000nm、500 ~ 1000nm、200 ~ 500nm、100 ~ 200nm 四个尺寸区间,且对于尺寸 >1000nm 的夹杂物选择 5000 ~ 10000 倍的视场,优选 5000 倍的视场,进行观察,100 ~ 1000nm 的夹杂物在 10000 ~ 20000 倍,优选 20000 倍的视场下统计,获取不同尺寸区间的夹杂物数量统计数据如表3所示。

[0033] 表3 夹杂物统计数据

[0034]

试样编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
铁损 $P_{1.5/50}$ (W/kg)	5.557	5.45	5.917	5.474	5.769	5.786	6.216	6.469	5.6801	5.1888
磁感 B_{50} (T)	1.7384	1.758	1.7322	1.7625	1.7442	1.7649	1.7396	1.7272	1.7321	1.7522
夹杂物统计(个)	>1000nm	2	3	7	7	5	0	6	3	1
	500~1000nm	25	8	35	21	26	6	14	10	15
	200~500nm	35	43	59	28	74	52	65	84	30
	100~200nm	5	5	3	1	4	1	2	10	3
	合计	67	59	104	57	109	59	87	108	48
	>1000nm	5	3	6	5	5	6	1	3	0
	500~1000nm	22	12	23	19	24	35	17	26	7
	200~500nm	25	32	48	26	64	42	48	29	27
	100~200nm	11	2	1	3	8	0	1	12	22
	合计	63	49	78	53	101	83	67	88	58

[0035] 本发明借助 IBMSPSSStatistics19.0 软件对夹杂物统计数据进行分析。

[0036] 首先采用标准差标准化法对无取向硅钢的磁性能(铁损 $P_{1.5/50}$ 、磁感 B_{50})及统计的夹杂物数据进行标准化处理,使各数值以相同的权重参加运算分析,分析中,将统计的夹杂物数量与自变量编号如表 4,标准化后的相关数据如表 5 所示,量纲为 1。

[0037] 表 4 夹杂物数量与自变量编号对应表

[0038]	轧面					
	夹杂物大小范围	>1000nm	500-1000nm	200-500nm	100-200nm	总计
	编号/个	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
	纵截面					
	夹杂物大小范围	>1000nm	500-1000nm	200-500nm	100-200nm	总计
	编号/个	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}

[0039] 表 5 标准化后的铁损、磁感及夹杂物统计数据

[0040]

编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
Y _P *	-0.51222	-0.79518	0.43981	-0.73171	0.04842	0.09338	1.23052	1.89958	-0.18668	-1.485
										93
Y _B *	-0.49804	0.95242	-0.95686	1.28544	-0.06882	1.46305	-0.40924	-1.32688	-0.96427	0.523
										20
x ₁ *	-0.69338	-0.28551	1.34597	1.34597	0.53023	-1.50912	0.93810	-0.28551	-0.28551	-1.101
										25
x ₂ *	0.81258	-1.05416	1.91067	0.37335	0.92239	-1.27378	-0.39531	-0.83454	-0.17569	-0.285
										50
轧面 x ₃ *	-0.87470	-0.45060	0.39759	-1.24579	1.19278	0.02651	0.71567	1.72290	-0.34458	-1.139
										76
夹杂物统计 x ₄ *	0.52337	0.52337	-0.22430	-0.97197	0.14953	-0.97197	-0.59813	2.39253	-0.22430	-0.598
										13
x ₅ *	-0.40712	-0.74996	1.17851	-0.83567	1.39279	-0.74996	0.44998	1.34993	-0.40712	-1.221
										37
纵 x ₆ *	0.39426	-0.48187	0.83232	0.39426	0.39426	0.83232	-1.35799	-0.48187	-1.79605	1.270
										38
截 x ₇ *	0.18237	-1.12026	0.31263	-0.20842	0.44289	1.87578	-0.46895	0.70342	-1.77157	0.052
面										11
x ₈ *	-1.06273	-0.52366	0.70848	-0.98572	1.94063	0.24643	0.70848	0.63148	-0.75469	-0.908
										71
x ₉ *	0.67211	-0.61491	-0.75792	-0.47191	0.24311	-0.90092	-0.75792	0.81512	2.24515	-0.471
										91
x ₁₀ *	-0.40057	-1.22527	0.48304	-0.98964	1.83791	0.77758	-0.16494	1.07211	-0.69511	-0.695
										11

[0041] 对标准化后的数据进行降维处理后,计算得到特征根和方差贡献率如表 6 所示。

[0042] 表 6 各成分的特征根和方差贡献率

[0043]

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累积贡献率/%
Z ₁	4.064	40.639	40.639	4.064	40.639	40.639
Z ₂	2.374	23.745	64.384	2.374	23.745	64.384
Z ₃	1.825	18.246	82.630	1.825	18.246	82.630
Z ₄	0.943	9.426	92.056			
Z ₅	0.543	5.431	97.487			
Z ₆	0.165	1.649	99.137			
Z ₇	0.071	0.711	99.847			
Z ₈	0.015	0.153	100.000			
Z ₉	6.850×10 ⁻⁷	6.850×10 ⁻⁶	100.000			
Z ₁₀	-9.613×10 ⁻¹⁶	-9.613×10 ⁻¹⁵	100.000			

[0044] 第一、二、三成分的特征值均大于 1, 且方差累积贡献率已达到 82.63%, 基本上包含了以上自变量 $x_1, x_2 \cdots x_{10}$ 的所有信息, 为了以尽可能少的指标反映尽量多的信息, 故选取前 3 个成分作为主成分, 前 3 个主成分的成分矩阵如表 7 所示。

[0045] 表 7 主成分的成分矩阵

	标准化后	主成分向量		
	的自变量	I_1	I_2	I_3
[0046]	x_1^*	0.308	-0.146	0.872
	x_2^*	0.278	0.130	0.780
	x_3^*	0.931	-0.223	-0.191
	x_4^*	0.464	-0.473	-0.416
	x_5^*	0.953	-0.203	0.187
	x_6^*	0.008	0.899	0.012
	x_7^*	0.450	0.756	-0.373
	x_8^*	0.927	0.092	0.058
	x_9^*	0.004	-0.766	-0.173
	x_{10}^*	0.916	0.217	-0.194

[0047] 计算出 3 个主成分的特征向量分别为：

$$t_1 = [0.15, 0.14, 0.46, 0.23, 0.47, 0, 0.22, 0.46, 0, 0.45]^T$$

$$t_2 = [-0.09, 0.08, -0.14, -0.31, -0.13, 0.58, 0.49, 0.06, -0.50, 0.14]^T$$

$$t_3 = [0.65, 0.58, -0.14, -0.31, 0.14, 0.01, -0.28, 0.04, -0.13, -0.14]^T$$

因此,相应的主成分表达式为：

$$Z_1 = 0.15x_1^* + 0.14x_2^* + 0.46x_3^* + 0.23x_4^* + 0.47x_5^* + 0.22x_7^* + 0.46x_8^* + 0.45x_{10}^* \quad (3)$$

$$Z_2 = -0.09x_1^* + 0.08x_2^* - 0.14x_3^* - 0.31x_4^* - 0.13x_5^* + 0.58x_6^* + 0.49x_7^* + 0.06x_8^* - 0.50x_9^* + 0.14x_{10}^* \quad (4)$$

$$Z_3 = 0.65x_1^* + 0.58x_2^* - 0.14x_3^* - 0.31x_4^* + 0.14x_5^* + 0.01x_6^* - 0.28x_7^* + 0.04x_8^* - 0.13x_9^* - 0.14x_{10}^* \quad (5)$$

[0048] 将标准化后的铁损 Y_P^* 、磁感 Y_B^* 与主成分 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 作多元线性回归分析,表 8 为分析过程中得到的方差分析表,计算出的回归方程为：

$$Y_P^* = 0.758Z_1 - 0.302Z_2 - 0.143Z_3 \quad (6)$$

$$Y_B^* = -0.503Z_1 + 0.603Z_2 - 0.113Z_3 \quad (7)$$

[0049] 表 8 多元线性回归分析的方差分析表

[0050]

	以铁损为因变量					以磁感为因变量				
	平方和	自由度	均方和	F	sig	平方和	自由度	均方和	F	sig
回	6.175	3	2.058			5.659	3	1.886		
归										
剩	2.825	6	0.471	4.371	0.059	3.341	6	0.557	3.387	0.095
余										
总	9.000	9	—			9.000	9	—		
计										

[0051] 表 8 中,在分析夹杂物与铁损、磁感的关系时, sig 值分别为 0.059 和 0.095,均大于 0.05,所以方程 6、7 中必有不显著变量,结合 SPSS 软件给出的回归系数显著性检验结果,如表 9 所示,可知方程 6、7 中最不显著的自变量均是 Z_3 ,去除后分别重新对 Y_P^* 、 Y_B^* 与自变量 Z_1 、 Z_2 作多元线性回归,得到新的方差分析表如表 10 所示。

[0052] 表 9 回归系数显著性检验结果

[0053]

自变量	以铁损为因变量			以磁感为因变量		
	标准系数	t	sig	标准系数	t	sig
Z_1	0.758	3.316	0.016	-0.503	-2.022	0.09
Z_2	-0.302	-1.319	0.235	0.603	2.423	0.052
Z_3	-0.143	-0.627	0.554	-0.113	-0.453	0.666

[0054] 表 10 回归系数显著性检验后的方差分析表

[0055]

	以铁损为因变量					以磁感为因变量				
	平方和	自由度	均方和	F	sig	平方和	自由度	均方和	F	sig
回	5.990	2	2.995	6.964	0.022	5.544	2	2.772	5.616	0.035
归										

剩	3.010	7	0.430	3.456	7	0.494
余						
总	9.000	9	—	9.000	9	—
计						

[0056] 表 10 中, sig 值均小于 0.05, 说明 Y_p^* 、 Y_B^* 分别关于 Z_1 、 Z_2 的多元线性回归分析是可靠的, 修正的回归方程如式 8、9 所示。

$$Y_p^* = 0.758Z_1 - 0.302Z_2 \quad (8)$$

$$Y_B^* = -0.503Z_1 + 0.602Z_2 \quad (9)$$

[0057] 利用公式 1 进行逆运算, 可得到铁损 Y_p 、磁感 Y_B 关于夹杂物总量及各尺寸区间的夹杂物数量的多元线性回归方程, 如式 10、11 所示。

$$Y_p = 0.02173x_1 + 0.0034x_2 + 0.00784x_3 + 0.03788x_4 + 0.00641x_5 - 0.02901x_6 + 0.00092x_7 + 0.00962x_8 + 0.00816x_9 + 0.00666x_{10} + 3.79068 \quad (10)$$

$$Y_B = -0.00071x_1 - 0.00003x_2 - 0.00023x_3 - 0.00153x_4 - 0.00018x_5 + 0.00207x_6 + 0.00032x_7 - 0.0002x_8 - 0.00058x_9 - 0.00011x_{10} + 1.78364 \quad (11)$$

[0058] 由式 10 及附图 2 可知, 随着各尺寸夹杂物数量的增加, 无取向硅钢的铁损总体呈增加的趋势; 轧面上 100 ~ 200nm 尺寸的夹杂物数量对铁损的劣化影响最大; 而纵截面上 100 ~ 200nm、200 ~ 500nm 尺寸的夹杂物数量在一定程度上对铁损的劣化影响最大。

[0059] 结合式 11 和附图 3 可以看出, 无取向硅钢的磁感随各尺寸夹杂物数量的增加总体呈减小的趋势; 轧面上 100 ~ 200nm 尺寸的夹杂物数量的增加对磁感劣化的影响最大; 纵截面上大于 500nm 的夹杂物数量对磁感的劣化影响不大, 而 100 ~ 200nm、200 ~ 500nm 的夹杂物数量在一定程度上对磁感的劣化影响最大。

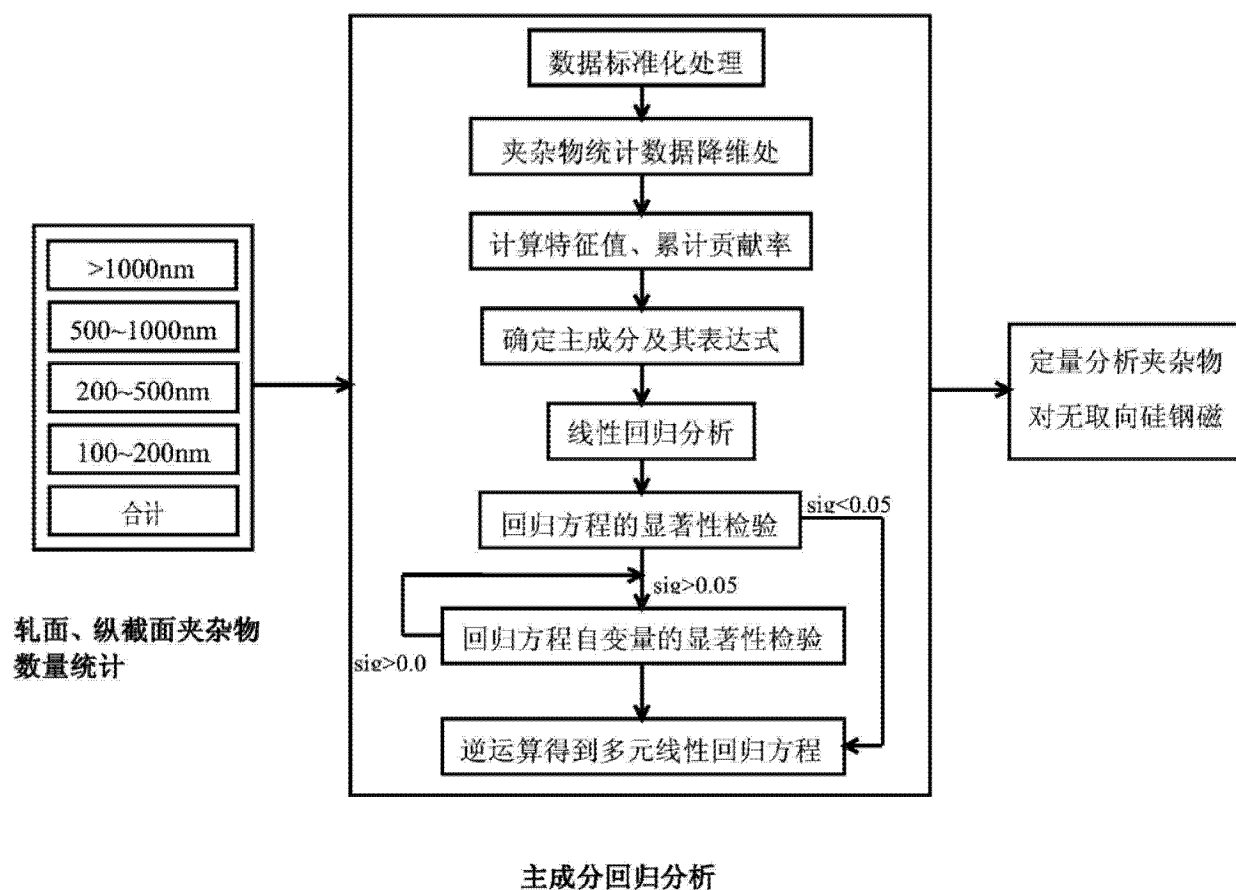


图 1

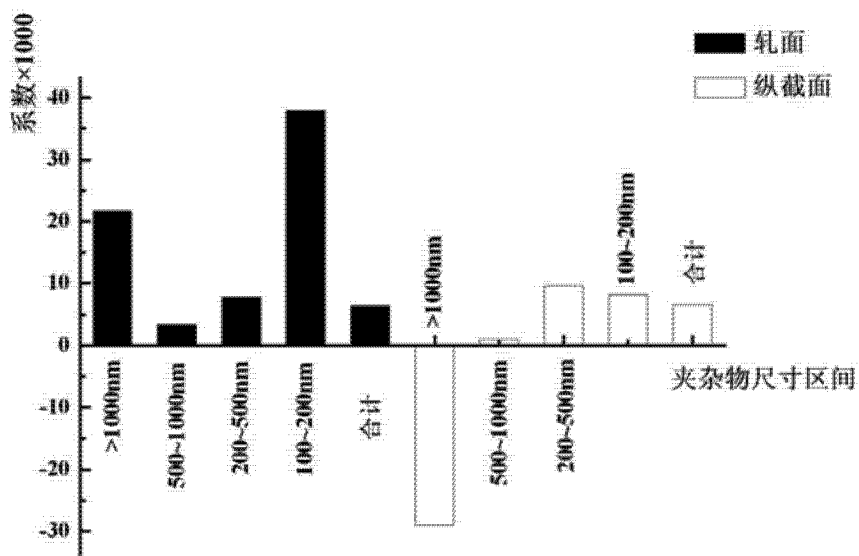


图 2

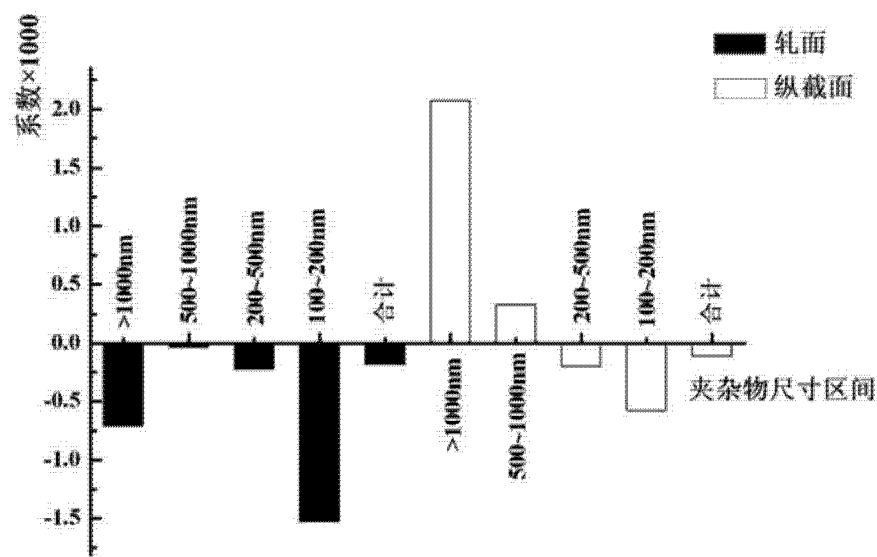


图 3