



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103593519 B

(45) 授权公告日 2016. 05. 04

(21) 申请号 201310533499. 8

CN 102446238 A, 2012. 05. 09,

(22) 申请日 2013. 10. 31

CN 101612713 A, 2009. 12. 30,

(73) 专利权人 中国运载火箭技术研究院

罗亚中. 近地轨道运载火箭轨迹 / 总体参数一体化优化设计. 《中国空间科学技术》. 2003, (第 5 期), 全文.

地址 100076 北京市丰台区北京 9200 信箱
38 分箱

胡凡等. 固体运载火箭轨迹 / 总体参数一体化优化设计研究. 《固体火箭技术》. 2010, 第 33 卷 (第 6 期), 全文.

(72) 发明人 吴胜宝 彭小波 张旭辉 申麟
胡冬生 李文清 高朝辉 张普卓

(74) 专利代理机构 中国航天科技专利中心
11009

审查员 罗运红

代理人 臧春喜

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

(56) 对比文件

US 6195104 B1, 2001. 02. 27,

US 6132108 A, 2000. 10. 17,

CN 101055530 A, 2007. 10. 17,

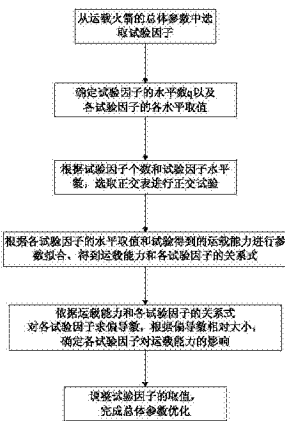
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法。传统的总体参数优化方法,往往需要总体设计专业、弹道设计专业经过多轮次的迭代才能得到,计算工作量大;多学科优化方法难于集成复杂模型,采用简化模型则会使结果失真。本发明通过试验设计,通过少数几次总体与弹道运算,得出运载能力与总体参数设计变量的拟合关系式,进而获取不同参数对运载能力的影响程度,既保证了计算结果的准确性,又提高了设计效率。同时本发明拟合得出的运载能力与火箭总体参数之间的解析关系式,既有利于总体参数的优化,也方便直观得出总体参数对运载能力的影响程度,有助于设计者提出改善性能指标的途径,进而更合理、有效地设置设计变量。



1. 一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法,其特征在于包括如下步骤:

(1) 从运载火箭的容许设计人员在一定范围内进行选择、优化的总体参数中选择出全部或部分参数作为试验因子,各试验因子记为 x_1 、 x_2 、 $\cdots$ 、 x_m ,其中 m 为试验因子的个数;

(2) 确定试验因子的取值范围,并根据试验因子的个数以及能够用于开展试验设计的时间,确定试验因子的水平数 q 以及各试验因子的各水平取值,试验因子的各水平取值在取值范围内均匀分布;

(3) 根据试验因子个数和试验因子水平数,选取正交表 $L_n(q^p)$,完成 n 次试验设计,得到 n 次试验设计下火箭的运载能力,其中 p 为试验表的列数; $L_n(q^p)$ 满足

$$n = q^k, k = 2, 3, 4, \cdots, p = (n-1)/(q-1)$$

其中, n 为试验次数,试验因子的水平数 q 一般取 2 或 3, k 的取值要保证 $p \geq m$;

(4) 根据各试验因子的水平取值和试验得到的运载能力,采用公式 $y = f(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 对试验设计的结果进行参数拟合,得到运载能力和各试验因子的关系式,其中 y 表示运载能力;

$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_m)$ 为二次多项式,具体表达式为:

当试验次数 $n > 2m + C_m^2 + 1$ 时,

$$y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + \cdots + a_m x_m^2 + a_{m+1} x_1 x_2 + a_{m+2} x_1 x_3 + \cdots + a_{m+C_m^2} x_{m-1} x_m \\ + a_{m+C_m^2+1} x_1 + a_{m+C_m^2+2} x_2 + \cdots + a_{2m+C_m^2} x_m + a_{2m+C_m^2+1}$$

当试验次数 $m + C_m^2 + 1 \leq n < 2m + C_m^2 + 1$ 时,

$$y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + \cdots + a_m x_m^2 + a_{m+1} x_1 x_2 + a_{m+2} x_1 x_3 + \cdots + a_{m+C_m^2} x_{m-1} x_m + a_{m+C_m^2+1}$$

当试验次数 $n < m + C_m^2 + 1$ 时,增大 k 值,直到试验次数 $n > m + C_m^2 + 1$

其中, $a_1, a_2, \cdots, a_{m+C_m^2+1}, \cdots, a_{2m+C_m^2+1}$ 为待定系数。

(5) 依据运载能力和各试验因子的关系式对各试验因子求偏导数,根据偏导数相对大小,确定各试验因子对运载能力的影响;

(6) 在现有总体参数的基础上,调整试验因子的取值,完成总体参数优化。

一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种运载火箭总体参数优化方法,尤其涉及一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法,属于运载火箭总体领域。

背景技术

[0002] 运载火箭的研制可分为方案设计阶段、初样设计阶段、试样设计阶段和定型阶段。在方案设计阶段,需要根据已确定的指标要求,通过对多种方案和技术途径的论证、比较,筛选出总体和分系统方案。

[0003] 运载火箭总体参数是总体方案的基础,为了选择出合适的、满足各种约束条件、优化的总体参数,往往需要对多套总体参数进行对比分析。对比分析过程中,可用火箭运载能力作为一项衡量要素。在运载火箭起飞质量不变的情况,优化总体参数,可提高运载能力。

[0004] 在当前运载火箭型号设计中常采用传统的总体参数设计方法,首先由运载火箭总体设计专业估算出一轮总体参数,然后交由弹道专业进行运载能力复核,总体专业再根据复核结果调整总体参数,如此迭代多轮,最终得到满足运载能力的总体参数,从而初步确定火箭的技术方案。该方法的缺点是总体、弹道分开单独计算,需要经过数次轮回迭代,设计效率较低。

[0005] 总体参数优化设计本质上属于多学科联合优化问题。为了提高优化效率,国内外普遍对多学科设计优化(MDO)方法展开了研究和应用,通过一体化优化平台,自动实现目标的迭代优化,设计效率高。但这类方法对于计算模型过于复杂、设计变量过多的情况的集成难度较大;另一方面,若采用简化模型进行集成,则优化计算具有一定失真,不能得到较准确的结果。

[0006] 在总体参数优化中,总体参数的计算模型比较简单,但对某些构型而言弹道计算模型比较复杂、设计变量较多,尚不具备开展多学科集成优化的条件。

发明内容

[0007] 本发明解决的技术问题是:克服现有技术的不足,提供一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法,只需进行少量的样本计算即可获取不同参数对运载能力的影响程度,既保证了计算结果的准确性,又提高了设计效率,达到了快速完成总体参数优化的目的。

[0008] 本发明的技术方案是:一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法,包括如下步骤:

[0009] (1) 从运载火箭的容许设计人员在一定范围内进行选择、优化的总体参数中选出全部或部分参数作为试验因子,各试验因子记为 $x_1, x_2, \dots, x_m$, 其中 m 为试验因子的个数;

[0010] (2) 确定试验因子的取值范围,并根据试验因子的个数以及能够用于开展试验设计的时间,确定试验因子的水平数 q 以及各试验因子的各水平取值,试验因子的各水平取值在取值范围内均匀分布;

[0011] (3)根据试验因子个数和试验因子水平数,选取正交表 $L_n(q^p)$, 完成 n 次试验设计, 得到 n 次试验设计下火箭的运载能力, 其中 p 为试验表的列数;

[0012] (4) 根据各试验因子的水平取值和试验得到的运载能力, 采用公式 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 对试验设计的结果进行参数拟合, 得到运载能力和各试验因子的关系式, 其中 y 表示运载能力;

[0013] (5) 依据运载能力和各试验因子的关系式对各试验因子求偏导数, 根据偏导数相对大小, 确定各试验因子对运载能力的影响;

[0014] (6) 在现有总体参数的基础上, 调整试验因子的取值, 完成总体参数优化。

[0015] 所述步骤(3)中 $L_n(q^p)$ 满足

[0016] $n=q^k, k=2, 3, 4, \dots, p=(n-1)/(q-1)$

[0017] 其中, n 为试验次数, 试验因子水平数 q 一般取 2 或 3, k 的取值要保证 $p \geq m$ 。

[0018] 所述步骤(4)中 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为二次多项式, 具体表达式为:

[0019] 当试验次数 $n > 2m + C_m^2 + 1$ 时,

$$[0020] \quad y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_m x_m^2 + a_{m+1} x_1 x_2 + a_{m+2} x_1 x_3 + \dots + a_{m+C_m^2} x_{m-1} x_m \\ + a_{m+C_m^2+1} x_1 + a_{m+C_m^2+2} x_2 + \dots + a_{2m+C_m^2} x_m + a_{2m+C_m^2+1}$$

[0021] 当试验次数 $m + C_m^2 + 1 < n < 2m + C_m^2 + 1$ 时,

[0022]

$$y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_m x_m^2 + a_{m+1} x_1 x_2 + a_{m+2} x_1 x_3 + \dots + a_{m+C_m^2} x_{m-1} x_m + a_{m+C_m^2+1}$$

[0023] 当试验次数 $n < m + C_m^2 + 1$ 时, 增大 k 值, 直到试验次数 $n > m + C_m^2 + 1$

[0024] 其中, $a_1, a_2, \dots, a_{m+C_m^2+1}, \dots, a_{2m+C_m^2+1}$ 为待定系数。

[0025] 本发明与现有技术相比具有如下有益效果:

[0026] (1) 本发明总体参数计算与弹道计算模型均未经过简化, 可以尽可能准确地表现出火箭的运载能力等性能指标。

[0027] (2) 本发明采用正交试验方法, 只需进行少量的样本计算, 而不必开展大量多轮次的迭代计算, 提高了设计效率。

[0028] (3) 本发明能够拟合得出运载能力与火箭总体参数之间的解析关系式, 既有利于总体参数的优化, 也方便直观得出总体参数各设计变量对运载能力的影响程度, 有助于设计者提出增大运载能力的途径, 更合理、有效地开展总体参数设计。

附图说明

[0029] 图 1 为本发明方法流程图;

[0030] 图 2 为本发明数值拟合后与试验值的比较图。

具体实施方式

[0031] 如图 1 所示, 本发明提供了一种基于试验设计的运载火箭总体参数优化方法, 包

括如下步骤：

[0032] (1) 从运载火箭的容许设计人员在一定范围内进行选择、优化的总体参数中选择出全部或部分参数作为试验因子,各试验因子记为 $x_1, x_2, \dots, x_m$, 其中 m 为试验因子的个数；

[0033] (2) 确定试验因子的取值范围,并根据试验因子的个数以及能够用于开展试验设计的时间,确定试验因子的水平数 q 以及各试验因子的各水平取值,试验因子的各水平取值在取值范围内均匀分布；

[0034] (3) 根据试验因子个数和试验因子水平数,选取正交表 $L_n(q^p)$, 完成 n 次试验设计,得到 n 次试验设计下火箭的运载能力,其中 p 为试验表的列数；

[0035] $L_n(q^p)$ 满足

[0036] $n=q^k, k=2, 3, 4, \dots, p=(n-1)/(q-1)$

[0037] 其中, n 为试验次数,试验因子水平数 q 一般取 2 或 3, k 的取值要保证 $p \geq m$ 。

[0038] (4) 根据各试验因子的水平取值和试验得到的运载能力,采用公式 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 对试验设计的结果进行参数拟合,得到运载能力和各试验因子的关系式,其中 y 表示运载能力；

[0039] $y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为二次多项式,具体表达式为：

[0040] 当试验次数 $n > 2m + C_m^2 + 1$ 时,

$$y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_m x_m^2 + a_{m+1} x_1 x_2 + a_{m+2} x_1 x_3 + \dots + a_{m+C_m^2} x_{m-1} x_m$$

$$+ a_{m+C_m^2+1} x_1 + a_{m+C_m^2+2} x_2 + \dots + a_{2m+C_m^2} x_m + a_{2m+C_m^2+1}$$

[0041]

[0042] 当试验次数 $m + C_m^2 + 1 < n < 2m + C_m^2 + 1$ 时,

[0043]

$$y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_m x_m^2 + a_{m+1} x_1 x_2 + a_{m+2} x_1 x_3 + \dots + a_{m+C_m^2} x_{m-1} x_m + a_{m+C_m^2+1}$$

[0044] 当试验次数 $n < m + C_m^2 + 1$ 时,增大 k 值,直到试验次数 $n > m + C_m^2 + 1$

[0045] 其中, $a_1, a_2, \dots, a_{m+C_m^2+1}, \dots, a_{2m+C_m^2+1}$ 为待定系数。

[0046] (5) 依据运载能力和各试验因子的关系式对各试验因子求偏导数,根据偏导数相对大小,确定各试验因子对运载能力的影响；

[0047] (6) 在现有总体参数的基础上,调整试验因子的取值,完成总体参数优化。

[0048] 实施例：

[0049] (1) 目的

[0050] 总体参数优化的目的是提高运载火箭的运载能力。火箭运载能力作为参数优化的指标,也是试验设计的指标。

[0051] (2) 试验因子

[0052] 运载火箭总体方案论证阶段,有一类总体参数容许火箭设计人员在一定范围内进行选择、优化,如发动机推力、加注量、比冲、级间比等。总体参数也就是本发明试验设计的试验因子。

[0053] 本发明中的液体运载火箭为一个三级构型火箭,一级、二级、三级发动机的推力、

比冲为确定值。

[0054] 本发明选取火箭起飞推重比,一级级间比,二二级级间比为试验因子,各因子分别记为 x_1 、 x_2 、 x_3 。

[0055] (3) 试验因子水平

[0056] 本发明中各试验因子采用三水平,因子水平如表 1 所示。

[0057] 表 1 因子水平表

[0058]

因子名称	水平 1	水平 2	水平 3
起飞推重比	1.2	1.3	1.4
一级级间比	0.15	0.2	0.25
二二级级间比	0.15	0.2	0.25

[0059] (4) 正交试验设计

[0060] 选用三水平正交表 $L_9(3^4)$ 进行试验设计,9 次试验计划及试验结果(运载能力)如表 2 所示。

[0061] 表 2 正交试验计划与试验结果

[0062]

	x_1	x_2	x_3		运载能力 (kg)
试验号	1	2	3	4	试验结果
1#	1.2	0.15	0.15	1	1175
2#	1.2	0.2	0.2	2	1074
3#	1.2	0.25	0.25	3	118
4#	1.3	0.15	0.2	3	1189
5#	1.3	0.2	0.25	1	315
6#	1.3	0.25	0.15	2	759

[0063]

7#	1.4	0.15	0.25	2	1106
8#	1.4	0.2	0.15	3	997
9#	1.4	0.25	0.2	1	243

[0064] 从试验结果可以看出,在相同的起飞推重比下(即运载火箭的起飞质量相同),级间比设计不同可能引起运载能力差异很大。对于一定的运载能力要求,通过合理的级间比设计,可以提高起飞推重比,即降低运载火箭起飞质量。

[0065] (5) 参数数值拟合

[0066] 采用式(1)对试验设计的计算结果进行拟合。

[0067]
$$y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + a_3 x_3^2 + a_4 x_1 x_2 + a_5 x_1 x_3 + a_6 x_2 x_3 + a_7 \quad (1)$$

[0068] 式中二次项中各交叉项能够反映出各因子之间的交叉作用关系,且二次项中的平

方项能够代表一次项反映出参数变化引起运载能力的变化。

[0069] 数值拟合后,表达式为:

[0070]

$$y = -162.02x_1^2 + 28632x_2^2 - 7994.6x_3^2 - 7150.8x_1x_2 + 6084.9x_1x_3 - 48918x_2x_3 + 2424 \quad (2)$$

[0071] 数值拟合的结果如图 2 所示。数值拟合的结果与各次试验结果比较如表 3 所示。从表中可以看出,由于试验次数、变量参数关系复杂、拟合项少等因素,数值拟合结果与试验结果存在一定的差值,尤其在 3 个试验点相差加大,达到 25%-48%。这 3 个试验点分布在 3 个起飞推重比下,且芯一级、芯二级的级间比都较大。在其他的试验点,数值拟合结果与试验结果吻合程度较好,相差都在 16% 以内。

[0072] 表 3 中也给出了某火箭优化前总体参数($x_1=1.3119$, $x_2=0.1969$, $x_3=0.1684$)对应的运载能力,为 1100kg,根据数值拟合表达式计算,拟合结果为 980kg,误差 -10.91%。

[0073] 表 3 数值拟合结果与各次试验结果比较

[0074]

工况	试验结果 (kg)	数值拟合结果 (kg)	差值
1	1175	1363	15.95%
2	1074	804	-25.20%

[0075]

3	118	103	-12.74%
4	1189	1195	0.50%
5	315	468	48.81%
6	759	788	3.80%
7	1106	1045	-5.55%
8	997	880	-11.73%
9	243	331	36.32%
现有参数	1100	980	-10.91%

[0076] (6) 敏感性分析

[0077] 以现有总体参数为基础,依据数值拟合表达式(2)进行参数敏感性分析(求算偏导数),进而修正总体参数。

[0078] 对式(2)求偏导,并代入现有总体参数($x_1=1.3119$, $x_2=0.1969$, $x_3=0.1684$),得到运载能力对各变量参数的偏导数为

$$[0079] \quad \frac{\partial y}{\partial x_1} = 2a_1x_1 + a_4x_2 + a_5x_3 = -818.9$$

$$[0080] \quad \frac{\partial y}{\partial x_2} = 2a_2x_2 + a_4x_1 + a_6x_3 = -6958.1$$

$$[0081] \quad \frac{\partial y}{\partial x_3} = 2a_3x_3 + a_5x_1 + a_6x_2 = -4341.8$$

[0082] 由偏导数可以看出：

[0083] 1) 级间比对运载能力的影响要大于起飞推重比；

[0084] 2) 一级级间比对运载能力的影响大于二级级间比；

[0085] 3) 在其他参数不变的情况，降低某一变量(起飞推重比或一、二级级间比)的值，都会增大运载能力。

[0086] (7) 增大运载能力途径分析

[0087] 通过调整起飞推重比、一级级间比、二级级间比中的一个、两个或三个，可以增大液氧甲烷火箭运载能力。在考虑各参数变化影响运载能力变化方向一致的情况下，即各参数变化都会增大运载能力，此时，运载能力增大途径有 7 条。

[0088] 1) 降低起飞推重比，一级级间比不变，二级级间比不变；

[0089] 2) 起飞推重比不变，降低一级级间比，二级级间比不变；

[0090] 3) 起飞推重比不变，一级级间比不变，降低二级级间比；

[0091] 4) 降低起飞推重比，降低一级级间比，二级级间比不变；

[0092] 5) 降低起飞推重比，降低二级级间比，一级级间比不变；

[0093] 6) 起飞推重比不变，降低一级级间比，降低二级级间比；

[0094] 7) 降低起飞推重比，降低一级级间比，降低二级级间比。

[0095] 在本发明中，因为一子级的质量不能再增大，因此在上述 7 条途径中，第 1)、2)、4)、5)、6)、7) 不符合，只有第 3) 条途径可以，即在保持起飞质量、一子级质量不变的情况，增大二子级质量、减小三子级质量，可以提高运载能力。

[0096] (8) 总体参数优化

[0097] 采用第 3) 条途径后进行总体参数优化，只降低试验因子 x_3 的值，即降低二级级间比的值，优化前后的试验因子取值如下表所示。并经过弹道专业核算后，运载能力为 1150kg，提高了 4.54%。

[0098] 表 4 优化前后的因子水平及运载能力

因子名称	总体参数	总体参数
	优化前	优化后
起飞推重比	1.338	1.338
一级级间比	0.197	0.197
二级级间比	0.168	0.15
运载能力 (kg)	1100	1150

[0099]

[0100] 本发明未详细描述内容为本领域技术人员公知技术。

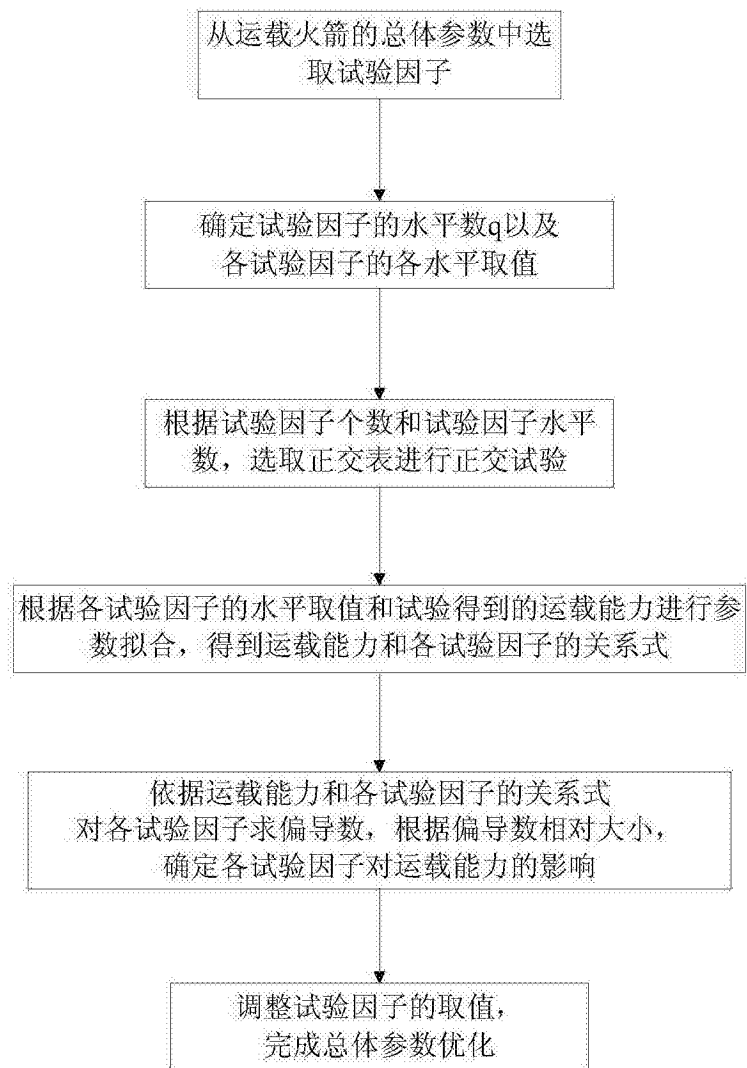


图 1

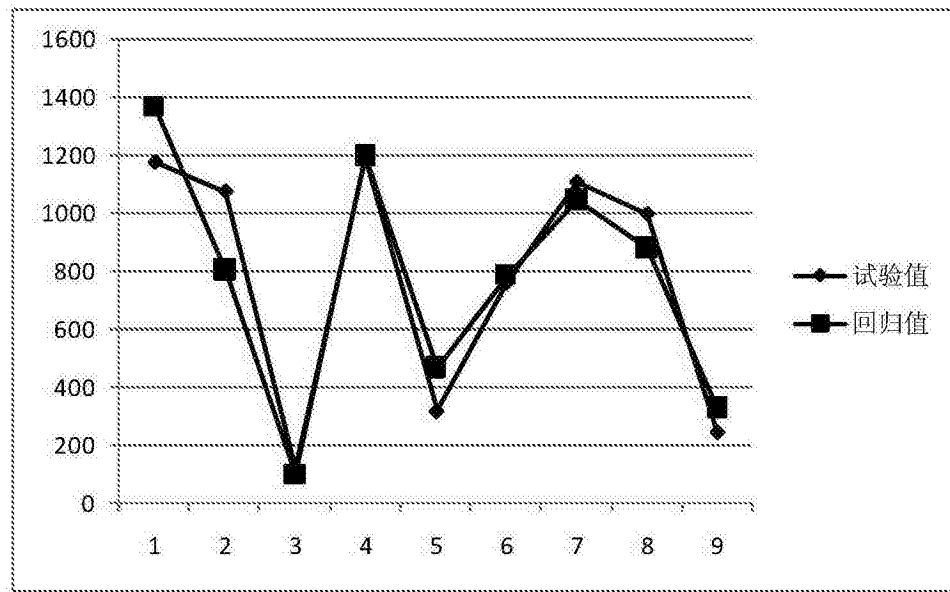


图 2