

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102194025 B

(45) 授权公告日 2013. 07. 17

(21) 申请号 201110037461. 2

(22) 申请日 2011. 01. 26

(30) 优先权数据

12/719, 764 2010. 03. 08 US

(73) 专利权人 利弗莫尔软件技术公司

地址 美国加利福尼亚州利弗莫尔市

(72) 发明人 图沙尔·戈尔

(74) 专利代理机构 深圳市顺天达专利商标代理

有限公司 44217

代理人 郭伟刚 李琴

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

审查员 高民芳

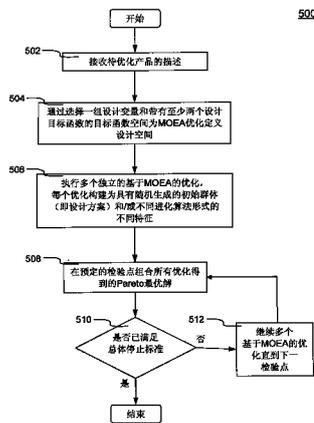
权利要求书1页 说明书7页 附图9页

(54) 发明名称

基于多目标进化算法的工程设计优化中的改进方法和系统

(57) 摘要

本发明公开了在例如汽车、手机等产品的工程设计优化中获得一组更好地收敛和多样化的 Pareto 最优解的系统和方法。依据一方面, 独立地进行产品的多个基于多目标进化算法的工程设计优化。每个独立进行的优化在初始代和 / 或进化算法等参数上与其它优化不同。例如, 初始代的群体 (设计方案) 可从随机或伪随机数生成器的结果随机生成。另外, 每个优化采用特定的进化算法, 包括但不限于非支配排序遗传算法、Pareto 强度进化算法等。而且, 每个独立进行的优化得到的 Pareto 最优解被组合以生成一组更好地收敛和多样化的解。该组合可以在优化的过程中在一个或多个检验点进行。



1. 一种计算机实施的方法,用于在产品的基于多目标进化算法的工程设计优化中获得一组多样化的 Pareto 最优解,其特征在于,所述方法包括:

由计算机系统中的应用程序模块接收待优化产品的描述;

由所述应用程序模块独立地进行所述产品的多个基于多目标进化算法的工程设计优化,所述工程设计优化构建为利用一组共同的设计变量和一组共同的设计目标函数,其中,每个工程设计优化与其它工程设计优化在初始代的设计方案和进化方案上不同;

由所述应用程序模块通过将从每个所述工程优化得到的 Pareto 最优解组合在一个或多个预定的检验点获得 Pareto 最优解的组合集;及

当基于扩散和均一测量手段的工程设计优化的任意一个或全部已收敛时,由所述应用程序模块指定所述 Pareto 最优解的组合集作为 Pareto 全局最优解,其中,所述 Pareto 全局最优解存储在存储设备中,并基于用户的指令在显示器上以图形方式表示;

还包括由所述应用程序模块为所述进化方案采用一个或多个进化算法;所述一个或多个进化算法包括但不限于非支配排序遗传算法和 Pareto 强度进化算法。

2. 根据权利要求 1 所述的计算机实施的方法,其特征在于,还包括由所述应用程序模块为每个所述工程设计优化生成初始代的设计方案。

3. 根据权利要求 1 所述的计算机实施的方法,其特征在于,所述一个或多个预定的检验点由代点的数量来确定。

4. 根据权利要求 1 所述的计算机实施的方法,其特征在于,所述一个或多个预定的检验点由目标函数评价的数量来确定。

5. 根据权利要求 1 所述的计算机实施的方法,其特征在于,所述 Pareto 最优解组合集中的每一个解相对其它解是非支配的。

6. 一种系统,用于在产品的基于多目标进化算法的工程设计优化中获得一组多样化的 Pareto 最优解,其特征在于,所述系统包括:

第一单元,用于接收待优化产品的描述;

第二单元,用于独立地进行所述产品的多个基于多目标进化算法的工程设计优化,所述工程设计优化构建为利用一组共同的设计变量和一组共同的设计目标函数,其中,每个工程设计优化与其它工程设计优化在初始代的设计方案和进化方案上不同;

第三单元,用于通过将从每个所述工程优化得到的 Pareto 最优解组合在一个或多个预定的检验点获得 Pareto 最优解的组合集;及

当基于扩散和均一测量手段的工程设计优化的任意一个或全部已收敛时,指定所述 Pareto 最优解的组合集作为 Pareto 全局最优解,其中,所述 Pareto 全局最优解存储在存储设备中,并基于用户的指令在显示器上以图形方式表示;

还包括所述进化方案采用一个或多个进化算法;所述一个或多个进化算法包括但不限于非支配排序遗传算法和 Pareto 强度进化算法。

7. 根据权利要求 6 所述的系统,其特征在于,还包括为每个所述工程设计优化随机生成初始代的设计方案。

## 基于多目标进化算法的工程设计优化中的改进方法和系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及工程设计优化,更具体而言,涉及一种在基于多目标进化算法(MOEA)的工程设计优化中获得一组更好地收敛和多样化的 Pareto(帕累托)全局最优解的改进方法。

### 背景技术

[0002] 现在,计算机辅助工程(CAE)已被用在分析、模拟、设计、制造等工作中帮助工程师。在传统的工程设计过程中,CAE分析(如有限元分析(FEA)、有限差分分析、无网格分析、计算流体动力学(CFD)分析、用于减少噪声-振动-声振粗糙度(NVH)的模态分析等)已被用来评价响应(例如压力、位移等)。以汽车设计为例,利用FEA分析汽车的特定版本或设计,以获得特定负载状态下的响应。之后,工程师基于特定的目标和约束条件修改一些参数或设计变量(例如钢壳的厚度、车架的位置等),以试图改进汽车设计。另一FEA被处理为反映这些变化,直到实现“最优”设计。然而,该方法通常依赖于工程师的或基于试错法的认识。

[0003] 而且,如在任意工程问题或项目中常见的,这些目标和约束条件通常相互冲突,相互影响,是非线性的设计变量。因此,如何修改它们以实现“最优”设计或折衷(trade-off),并不十分清楚。在需要数种不同CAE分析(例如FEA、CFD和NVH)以满足一组冲突目标的多规则优化中,该情况变得尤为复杂。为解决此问题,利用被称为设计优化的鉴别“最优”设计的系统化方法。

[0004] 此类带多于一个目标函数的系统的优化被称为多目标优化。与单目标优化问题(SOP)相反,多目标优化问题(MOP)并不生成单一的最优解。其反而得到一组代表目标之间的不同折衷的最优解。这些解被称为 Pareto 最优解或 Pareto 最优解集。Pareto 最优解集的设计目标函数空间表示被公知为 Pareto 最优解前沿(POF)。找出 Pareto 最优解的最常用策略之一是将多目标优化问题转化为单目标优化问题,再找出单一折衷解。有多种途径将 MOP 转化为 SOP,即加权和策略、反向效用函数、目标程序设计、 $\epsilon$ -约束策略等。现有技术中将 MOP 转化为 SOP 的方法的缺点在于,每次优化模拟得到一个单一折衷解,多次模拟的结果可能不是充分多样化的折衷解。

[0005] 最近,工程设计优化方法之一是基于遗传算法(GA)或进化算法。遗传算法已被证实有效地解决了多目标优化问题,因为其在单一数值模拟中得到多样化的折衷解集。GA通常以随机生成的群体(populations)作为初始代开始。之后,杂交和/或突变等进化方案用于生成新一代。MOEA中的问题之一是,得到的 Pareto 最优解可能没有多样化(即扩散性和均一性可能差),或收敛性可能不足。

[0006] 为了在基于 MOEA 的工程优化中提高 POF 的质量,尤其是其多样性,因此,期望有改进的方法和系统,用于在基于 MOEA 的工程设计优化中实现一组多样化的 Pareto 全局最优解。

## 发明内容

[0007] 本发明公开了在产品（如汽车、手机等）的工程设计优化中获得一组更好地收敛和多样化的 Pareto 最优解的系统和方法。依据本发明的一方面，独立地处理产品的多个基于 MOEA 的工程优化。每个独立处理的优化与其它优化在初始代和 / 或进化算法等一些参数上不同。例如，初始代的群体（设计方案）可以从随机或伪随机数生成器的不同结果随机生成。另外，每个优化采用特定的进化算法，包括但不限于非支配排序遗传算法 (NSGA-II)、Pareto 强度进化算法 (SPEA) 等。

[0008] 依据本发明另一方面，将每个独立处理的优化的 Pareto 最优解组合以生成一组更好地收敛和多样化的解。该组合可以在优化的进化过程中在一个或多个预定的检验点进行。

[0009] 依据又一方面，在计算机系统中执行该基于 MOEA 的工程优化。例如，利用计算机辅助工程分析（例如有限元分析、无网格分析等）执行设计目标函数的评估。随机生成的群体是基于在计算机系统中实现的随机或伪随机数生成器的。

[0010] 结合附图审阅对本发明实施方式的下述详细说明，本发明的其它目的、特征和优点将变得明显。

## 附图说明

[0011] 结合下面的说明、未决的权利要求和附图，可更好地理解本发明的这些和其它特征、方面和优点。附图中：

[0012] 图 1A 是示出利用厚度作为设计变量优化的管状部件（代表性工程产品）的示意图；

[0013] 图 1B 是示出多目标函数空间中包括 Pareto 最优解的代表性解的示意图；

[0014] 图 1C 是用于执行本发明一个实施例的确定非支配解标准的代表性过程的流程图；

[0015] 图 2 是以图式示出 Pareto 前沿中的解的拥挤距离的定义的示意图；

[0016] 图 3A 是示出依据本发明实施方式将从两个独立处理的基于 MOEA 的优化得到的解组合的例子的示意图；

[0017] 图 3B 是示出依据本发明实施方式将从两个独立处理的基于 MOEA 的优化得到的解组合的例子的示意图；

[0018] 图 4 是示出组合多个基于 MOEA 的优化以形成一组更好地收敛和多样化的解的例子的示意图；

[0019] 图 5 是依据本发明实施方式通过将多个独立处理的基于 MOEA 的工程设计优化得到的 Pareto 最优解组合来获得一组更好地收敛和多样化的解的代表性过程的流程图；

[0020] 图 6 是利用遗传或进化算法进行工程优化的代表性过程的流程图；及

[0021] 图 7 是示出可在其中实施本发明的实施方式的计算装置的主要组成的功能模块图。

## 具体实施方式

[0022] 首先参考图 1A，在设计目标为在一定的设计负载条件下最小化重量以最小化指定

材料（例如普通强度钢）的成本的工程优化中，优化管状结构部件 102（即代表性工程产品）。明显的是，越薄的厚度 104 将导致越小重量的结构。然而，在某特定点上，结构将变得过于脆弱而不能承受设计负载（例如由材料屈服或材料曲率所致的失败结构）。因此，该管状结构的工程优化需要最大化强度这另一设计目标，其带来更安全的结构。该代表性例子中，厚度 104 是设计变量，其可具有作为设计空间的范围（例如，从 1/8 英寸到 1/2 英寸）。任何设计方案均从该空间内选出。在多目标进化算法中，每一代的群体或设计方案都选自设计空间。

[0023] 当仅有一个设计变量时，设计空间是一维的（例如一直线）。在两个变量时，设计空间变成二维区域，依此类推。对于三个以上的设计变量，设计空间是无法图示的多维空间。

[0024] 基于两个冲突的设计目标，图 1B 是示出代表性设计优化结果的 X-Y 图。两个轴以函数  $f_1$  和  $f_2$  形式表示两个不同目标。在多目标优化中，没有一个最优解，相反，有一组反映目标之间的折衷的解。为了区分每个解，称为非支配标准的概念用于比较这些解。

[0025] 图 1C 是确定非支配标准的代表性过程的流程图。按照设计目标函数（即多目标）评价两个设计方案，以获得各自的解 X 和 Y。如果以下三种条件任一为真，则解 X 支配 Y（步骤 172）。

[0026] 1. X 是可行的，Y 是不可行的（步骤 154 和 156）。

[0027] 2. X 和 Y 均是不可行的（步骤 160），但 X 相比 Y 的不可行程度低（步骤 162）。

[0028] 3. 当 X 和 Y 均是可行的，必须满足以下两个条件（步骤 170 和 172）：

[0029] a. X 在所有设计目标中不比 Y 差；

[0030] b. X 在至少一个设计目标中比 Y 确实好。

[0031] 而且，可以判定解 Y 是否支配 X（步骤 175 和 176）。最后，如果没有一个解支配另一个解，X 和 Y 相互是非支配的（步骤 178）。

[0032] 图 1B 示出了双目标无约束最小化的例子。每个点表示区域 116 内的一个设计方案（例如 MOEA 的指定代中的群体之一）的被评价的解。依据非支配标准，对于每个菱形 122，有至少一个三角形 124 在其它目标中不差的情况下，在至少一个目标中比菱形 122 好。故菱形 122 内的所有个体解受三角形 124 的支配。类似地，所有三角形 124 受方形 126 的支配，方形受圆形 128 的支配。由三角形 124 表示的解不能说比任意其它由三角形 124 表示的解更好，因此，它们对于彼此而言是非支配的。所有由圆形 128 表示的个体解相对任意其它个体解均是非支配的，从而具有最好或最高的级别（例如一级）。如果从图 1B 中除去所有由圆形表示的点，那么由方形 126 表示的个体将相对所有其它个体为非支配的。因此，方形 126 被分配到下一最好级别（例如二级），其余类推。

[0033] 在图 1B 所示例子中，圆形 128 表示一组 Pareto 最优解，连接所有圆形 128 的线 130 称为 Pareto 最优前沿 (Pareto optimal front)。应当注意，通常会有多于一个的个体或解具有同一级别。

[0034] Pareto 最优解的一个方面被称为多样性，其利用两种测量手段量化：扩散性和均一性。扩散性定义为 N 维函数空间中的一组 Pareto 最优解形成的最大超立方体的最大对角线长度。扩散性也可定义为最大超立方体的体积。均一性定义为在一组 Pareto 最优解中解的分布有多么均一。数学上，均一性  $\Delta$  可表示如下：

$$[0035] \quad \Delta = \sum_{i=1}^n \frac{|d_i - \bar{d}|}{n} \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

[0036] 其中,  $d_i$  定义为函数空间中解的拥挤距离 (见图 2 所示的图解实例), “n” 为一组 Pareto 最优解中解的总数量。拥挤距离定义为一个解周围不包括任意其它解的最大超立方体的周长的一半。边界点或解 (例如 210a 和 210n) 被分配有是离最近的点或解的距离的两倍的拥挤距离。均一性测量类似于拥挤距离的标准差, 因而期望均一性度量的值很小, 以此实现解的良好分布。

[0037] 图 2 示出由两个函数表示的设计目标函数空间 (即以  $f_1$  和  $f_2$  作为两个轴的二维函数空间) 中的一组代表性的 Pareto 最优解 (表示为圆点) 210a-n。Pareto 最优前沿由虚线 230 表示。两个最末端的解 210a 和 210n 之间的距离 240 被称为一组 Pareto 最优解的扩散性。解 210i 的拥挤距离  $d_i$  等于距离  $a_i$  加  $b_i$ 。

[0038] 为简化图示和说明, 在图 2 中仅示出了两个设计目标函数。本领域的普通技术人员应当了解, 其它数量的目标函数被用于为现实世界对象进行的优化。

[0039] 基于 MOEA 的工程设计优化的目的是获得完整的 Pareto 全局最优解集。然而, 对于现实世界的产品, Pareto 全局最优解集是未知的, 故期望包括“多样化”解的一组解。

[0040] 实现此目的的手段之一在图 3A-3B 所示的例子中示出。在图 3A 中, 独立地处理产品的两个基于 MOEA 的优化 (即第一和第二优化 302a-b)。每个优化从随机生成的初始代群体 (即设计方案) 开始。这两个优化之间的不同是, 初始代群体不同。在一实施方式中, 使用随机或伪随机数生成器的不同结果。结果, 由于不同序列的随机或伪随机数, 生成不同的群体。之后, 在目标函数空间中对设计方案 (群体) 进行评价和分级。图 3A 所示的初始代的第一和第二组 Pareto 最优解 304a-b 分别对应第一和第二优化 302a-b。优化按照示为“EA 305”箭头的进化算法 (例如 NSGA-II) 进行 N 个代。在第 N 代结束时, 得到相应 Pareto 最优解集 306a-b。之后, 将集 306a-b 组合成 Pareto 最优解的组合集 308。视觉上明显的是, 组合集 308 与集 306a-b 任意一个相比, 具有更宽的扩散性, 因此更好地收敛和多样化。当组合集 306a-b 时, 仅保留非支配解 (见示出确定支配解的代表性过程的图 1C)。例如, 解 309b 受解 309a 支配, 因此, 解 309b 不包含在最后的组合集 310 内。

[0041] 在图 3B 所示的例子中, 也独立地处理两个优化 312a-b。该例子中, 优化 312a-b 从作为初始代的同一组设计方案 (即群体) 开始。经评价设计目标和分级之后, 第一和第二组 Pareto 最优解 314a-b 是一样的。利用两个不同的由箭头“EA-1”315a 和箭头“EA-2”315b 表示的进化算法进行独立的优化。例如, “EA-1”为 NSGA-II, 而“EA-2”为 SPEA。在经过 N 代的进化后, 得到两组 Pareto 最优解 316a-b, 并将其组合为组合集 318。该例子中, 组合集 318 的均一性比第二组 316b 好得多, 组合集 318 的扩散性比第一组 316a 好。与之前的例子类似, 最后的组合集 320 仅包括集 318 中的非支配解。

[0042] 现在参照图 4, 其示出依据本发明的实施例在基于 MOEA 的工程设计优化中获得一组更好地多样化的 Pareto 最优解的更一般的例子。利用任意初始代的设计方案独立地处理多个基于 MOEA 的优化 (第一个到第 M 个 402a-m)。利用相同或不同的进化算法 (即“EA-1”405a... “EA-M”405m) 完成进化。在 N 个代后, M 组 Pareto 解 406a-m 被组合成组合集 408。应当注意, M 和 N 是正整数或自然数, 相比于每个独立的优化, 组合集 408 包括更好地收敛和多样化的解。最后, 从集 408 中除去被支配的解, 形成最终的组合集 410。

[0043] 图 5 是解释依据本发明的实施例通过组合从多个独立处理的基于 MOEA 的工程优化设计的 Pareto 最优解来获得这样一组多样化解的代表性过程 500 的流程图。过程 500 优选地在软件中实施。

[0044] 过程 500 开始于接收待优化产品（例如电子消费品、汽车、飞机等）的描述的步骤 502。在步骤 504，通过选择一组设计变量来定义产品的设计空间（见图 1 所示的非常简单的例子）。而且，通过确定基于 MOEA 的优化中的多个设计目标函数来定义目标函数空间。接着，在步骤 506，进行多个独立的基于 MOEA 的工程优化（见图 4 所示的例子）。每个优化构建为具有一些不同的特征或参数，例如初始代中的设计方案和 / 或进化算法（NSGA-II、SPEA 等）。接着，在步骤 508 中，在预定的检验点（例如在第 N 个进化代之后）将在每个优化中得到的 Pareto 最优解组合成解组合集。检验点可通过多个标准定义，例如目标函数评价的总数、代的数量或适于判定解组合集是否已达到 Pareto 全局最优解集的其它等价条件。过程 500 进行至判定步骤 510，判定是否满足了基于 MOEA 的优化的总体停止或结束标准。总体停止标准可在多种条件下实施。例如，其可定义为，当任意一个独立处理的优化已收敛，或当所有独立处理的优化已收敛。也可以在所有之前的检验点检查所有的组合集，以判定 Pareto 最优解是否已收敛。

[0045] 若为“否”，过程 500 进行至步骤 512，继续执行多个基于 MOEA 的优化，直到下一个检验点。之后，重复步骤 508 和判定步骤 510，直到判定步骤 510 结果为真。过程 500 结束于“是”分支。

[0046] 图 6 所示流程图示出了执行在产品的工程设计优化中使用的进化算法的代表性过程 600。过程 600 优选地在软件中实施。

[0047] 过程 600 开始于步骤 602，从设计空间中建立初始代群体（例如产品的设计方案）。设计空间是由“n”个设计变量定义的 n- 维超空间。初始代群体一般随机生成，这可在计算机系统（例如图 7 所示的计算机 700）中用随机或伪随机数生成器来模拟。接着，在步骤 604 评价每个设计方案。评价一般利用计算机辅助工程分析（例如有限元分析、无网格分析、边界元分析、计算流体动力学等）进行。计算机辅助分析的解被置于目标函数空间中。接着，在判定步骤 606，判定是否已满足预定的停止标准。如果为“否”，过程 600 进行至步骤 608，将解（例如图 1B 所示的非支配解）分级。也可以利用其它等价方法。

[0048] 在步骤 610，利用如杂交、突变等进化方案从前一代生成下一代的群体或设计方案。接着，过程 600 返回至步骤 604 重复执行直到判定步骤 606 结果为真。过程 600 结束。

[0049] 依据一方面，本发明涉及能够完成此处描述的功能的一个或多个计算机系统。计算机系统 700 的例子在图 7 中示出。计算机系统 700 包括一个或多个处理器，如处理器 704。处理器 704 连接到计算机系统内部通信总线 702。按照该代表性计算机系统描述了多个软件实施方式。在阅读该说明后，如何利用其它计算机系统和 / 或计算机功能结构实施本发明对于相关领域的技术人员是显而易见的。

[0050] 计算机系统 700 还包括主存储器 708（优选为随机存取存储器（RAM）），也可包括辅助存储器 710。辅助存储器 710 例如可包括一个或多个硬盘驱动器 712 和 / 或表示软盘驱动器、磁带驱动器、光盘驱动器等的的一个或多个移动存储驱动器 714。移动存储驱动器 714 以公知的方式读取和 / 或写入移动存储单元 718。移动存储单元 718 表示软盘、磁带、光盘等，其通过移动存储驱动器 714 读写。可以理解，移动存储单元 718 包括计算机可用的存储

介质,其中已存储计算机软件和 / 或数据。

[0051] 在可选实施例中,辅助存储器 710 可包括允许计算机程序或其它指令被载入计算机系统 700 中的其它类似装置。这样的装置可包括例如移动存储单元 722 和接口 720。这样的例子可包括程序盒式存储器和盒式接口(如视频游戏装置中可见的)、移动存储芯片(如可擦除或编程只读存储器 (EPROM)、通用串行总线 (USB) 闪存或 PROM) 和相应套接口,以及允许软件和数据从移动存储单元 722 转移到计算机系统 700 的其它移动存储单元 722 和接口 720。一般地,计算机系统 700 由操作系统 (OS) 软件控制和协调,OS 软件完成如进程调度、内存管理、网络 and I/O 服务等任务。

[0052] 另外,可以有连接到总线 702 的通信接口 724。通信接口 724 允许软件和数据在计算机系统 700 和外置设备之间转移。通信接口 724 的例子可包括调制解调器、网络接口(如以太网卡)、通信端口、PCMCIA(个人计算机存储卡国际协会)插槽和卡等。转移的软件和数据经由通信接口 724。计算机 700 在基于一组特定规则(即协议)的数据网络上与其它计算装置通信。常见协议之一是因特网中常用的 TCP/IP(传输控制协议 / 互联网协议)。通常,通信接口 724 将数据文件组装到在数据网络上传输的较小的数据包,或将接收的数据包重组为原始数据文件。另外,通信接口 724 处理每个数据包的地址部分,以使其到达正确的目的地或拦截去往计算机 700 的数据包。该文件中,术语“计算机程序介质”、“计算机可读介质”、“计算机可记录介质”和“计算机可用介质”一般用于涉及如移动存储驱动器 714(如闪存驱动器)和 / 或安装在硬盘驱动器 712 中的硬盘等介质。这些计算机程序产品是用于提供软件到计算机系统 700 的设备。本发明涉及这些计算机程序产品。

[0053] 计算机系统 700 也可包括输入 / 输出 (I/O) 接口 730(使计算机系统 700 访问显示器)、键盘、鼠标、打印机、扫描仪、打孔机和类似设备。

[0054] 计算机程序(也称为计算机控制逻辑)在主存储器 708 和 / 或辅助存储器 710 中存储为应用程序模块 706。计算机程序也可以通过通信接口 724 接收。当执行时,这样的程序使计算机系统 700 能够完成此处详述的本发明的特征。特别地,当执行时,计算机程序使处理器 704 能够完成本发明的特征。相应地,这样的计算机程序表示计算机系统 700 的控制器。

[0055] 在本发明用软件实施的实施例中,软件可存储在计算机程序产品中,并利用移动存储驱动器 714、硬盘驱动器 712 或通信接口 724 加载到计算机系统 700 中。当由处理器 704 执行时,应用程序模块 706 使处理器 704 完成此处详述的本发明的功能。

[0056] 主存储器 708 可加载一个或多个应用程序模块 706,应用程序模块 706 可在有或无通过 I/O 接口 730 的用户输入的情况下由一个或多个处理器 704 执行,以完成期望的任务。在运行中,当至少一个处理器 704 执行应用程序模块 706 之一时,结果被计算出并存储在辅助存储器 710(即硬盘驱动器 712)中。CAE 分析或工程设计优化(例如组合前、后的 Pareto 最优解)的状态通过 I/O 接口 730 以文本或图形表示汇报给用户。

[0057] 虽然结合具体实施例对本发明进行了说明,但是这些实施例仅是说明本发明,而非限制本发明。本领域的技术人员可以给出具体公开的代表性实施例的多种修改或改变。例如,尽管设计目标函数的数量表示为两个,实际上,可以使用更大数量的设计目标。而且,尽管每一代的群体或设计方案的大小示出并描述为较小的数量,作为替代也可以使用其它大小或数量。总之,本发明的范围不应限制为本文公开的具体的代表性实施例,本领域的普

通技术人员容易给出的所有修改均应包含在该申请的精神和范围,以及未决权利要求的范围内。

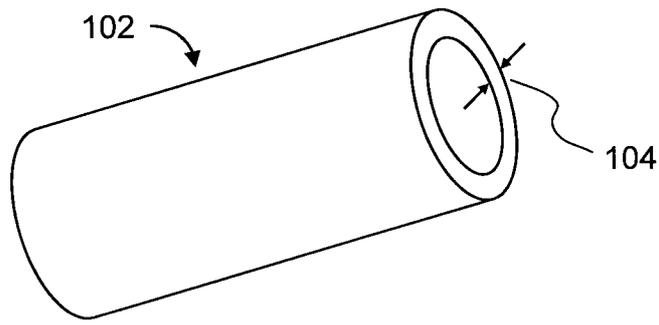


图 1A

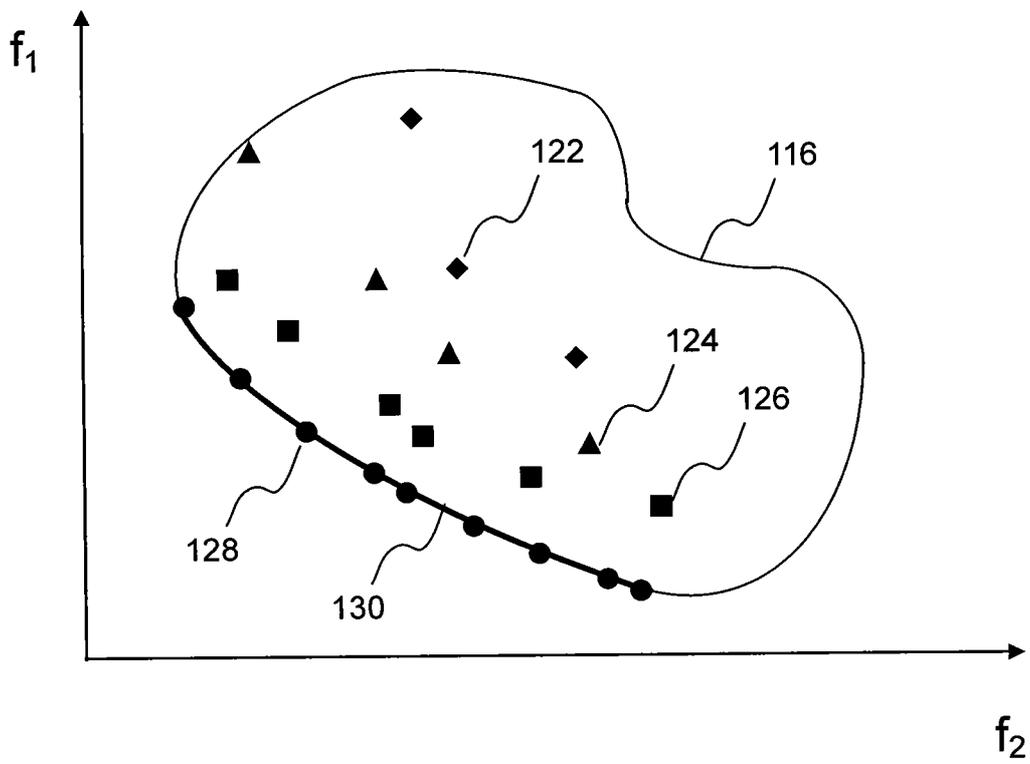


图 1B

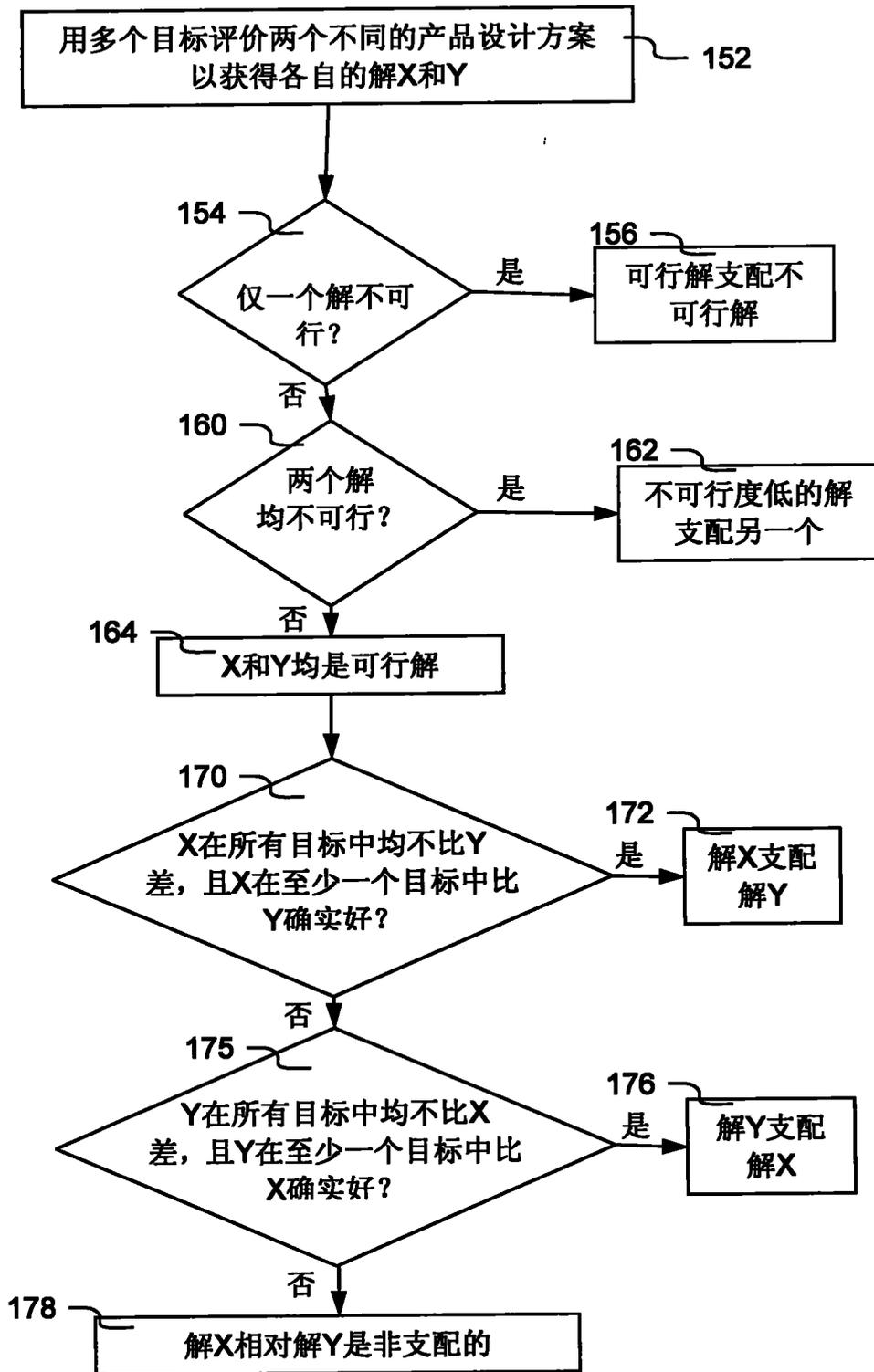


图 1C

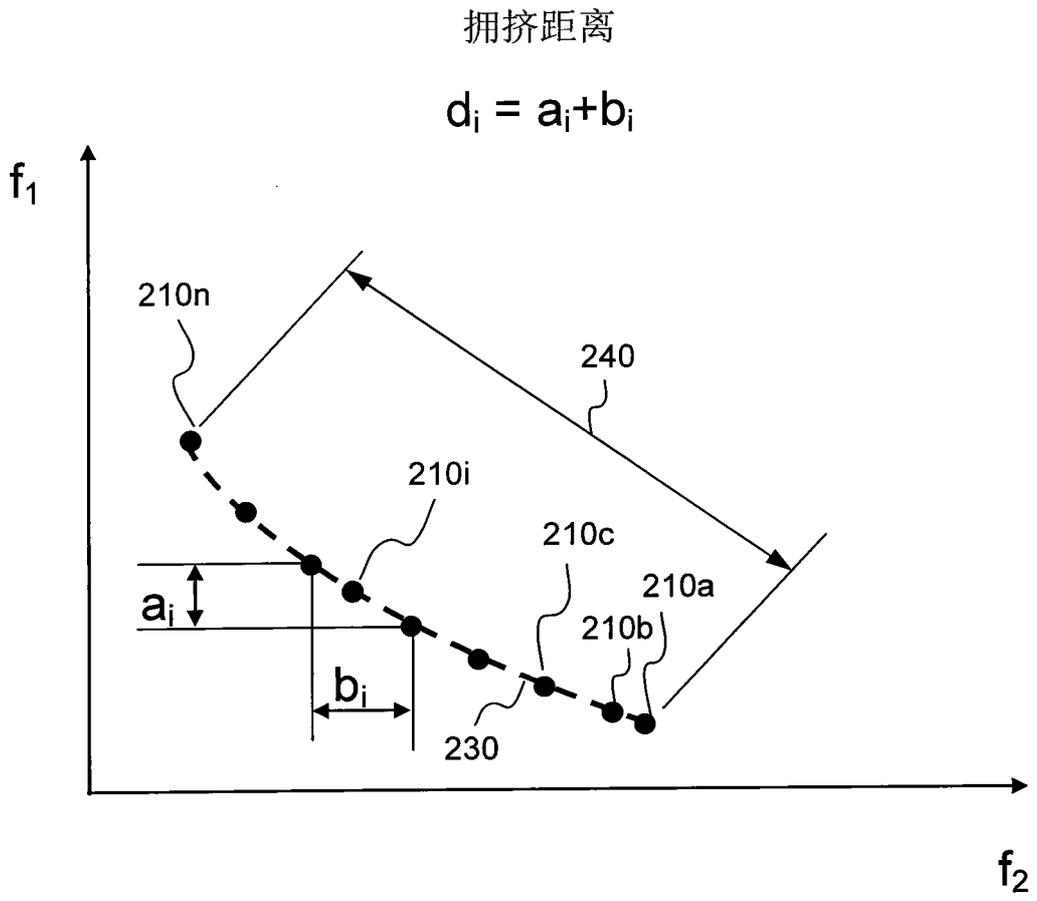


图 2

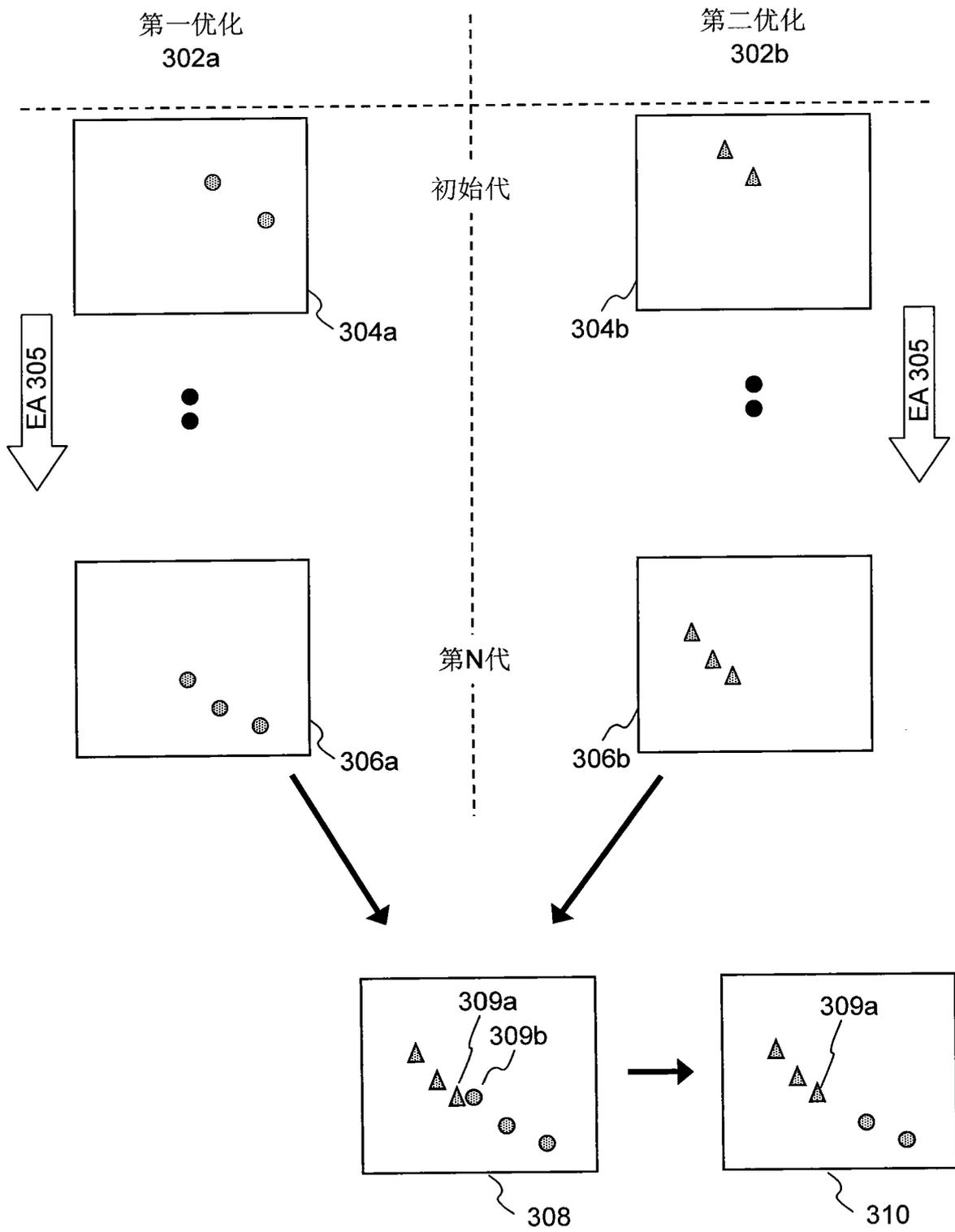


图 3A

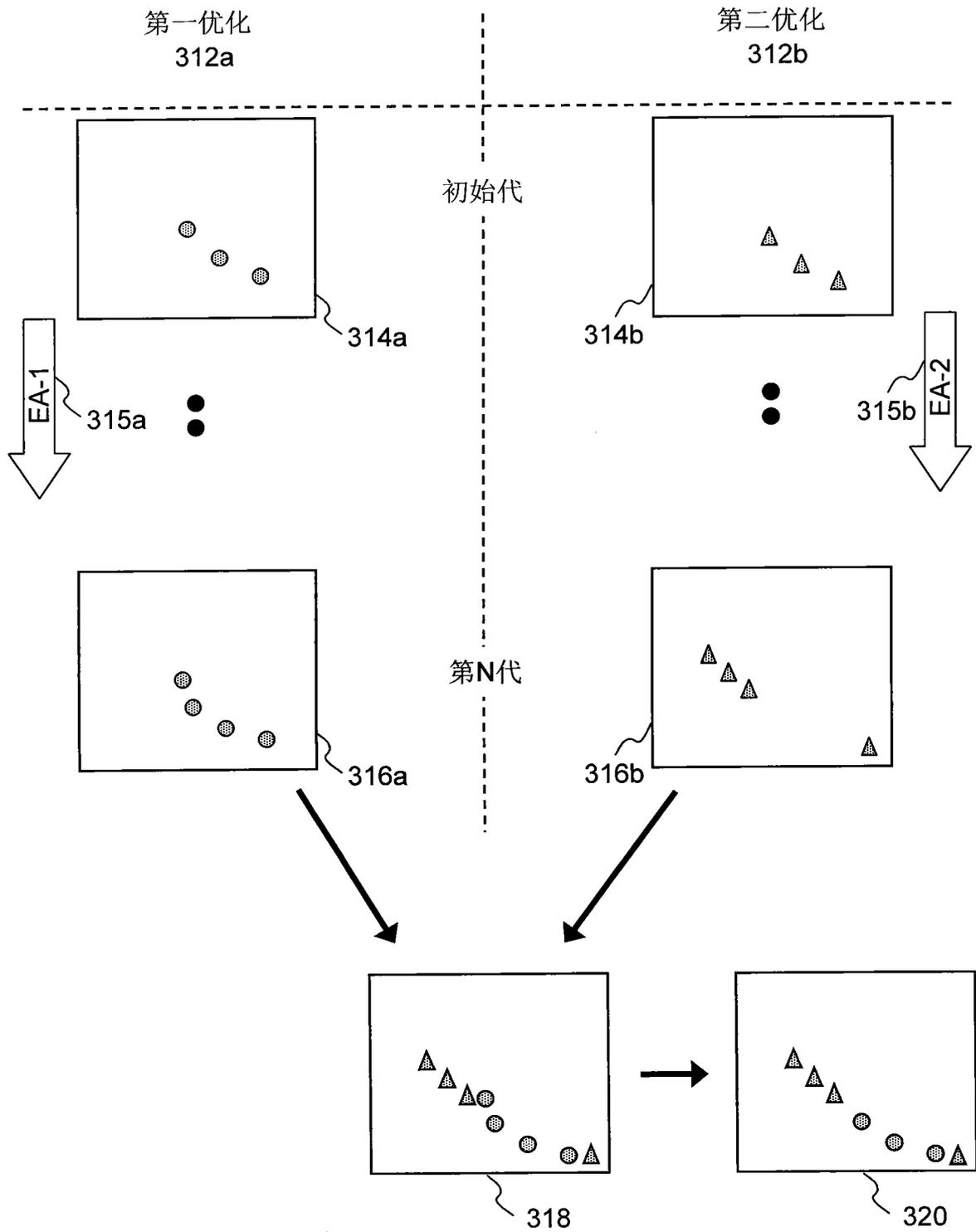


图 3B

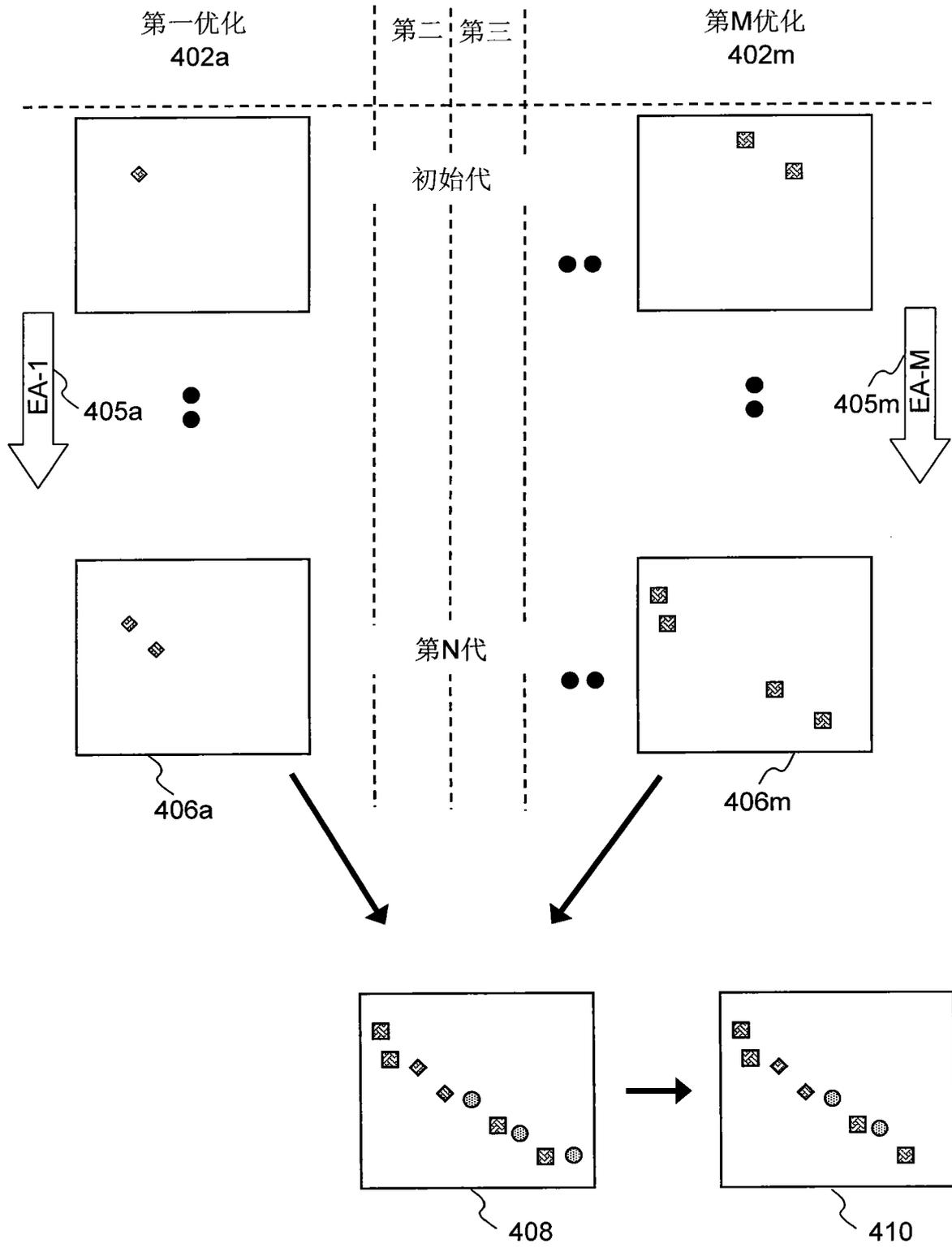


图 4

500

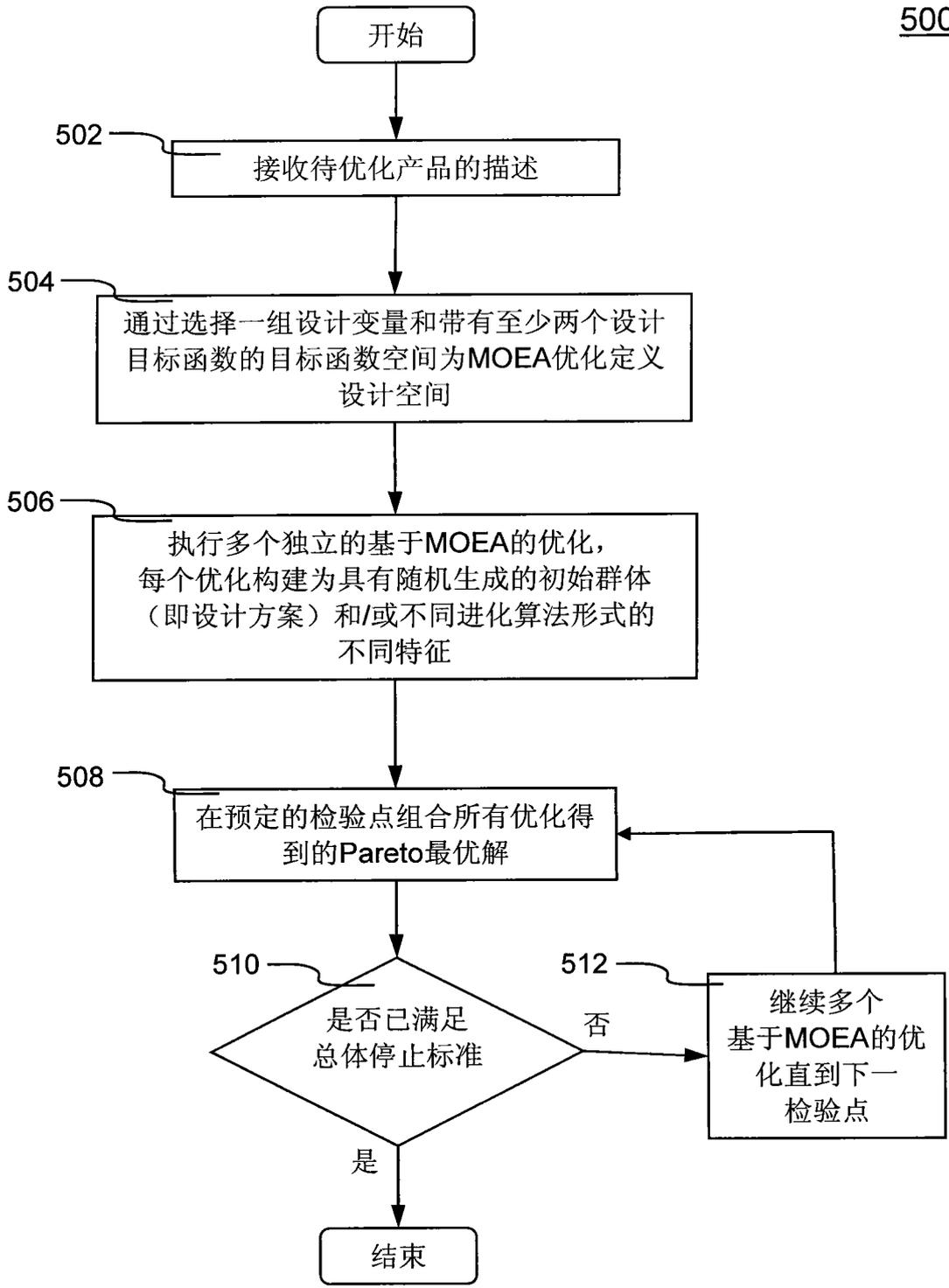


图 5

600

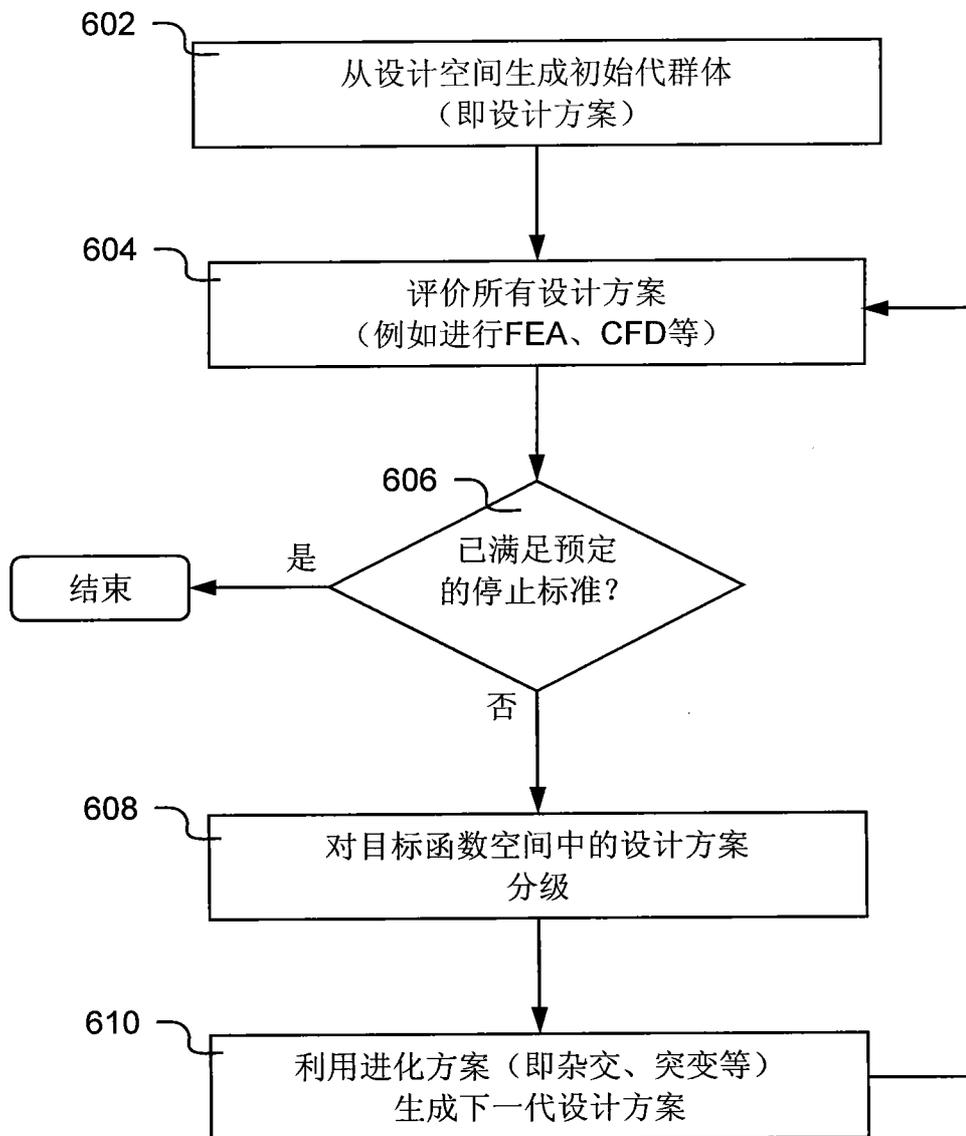


图 6

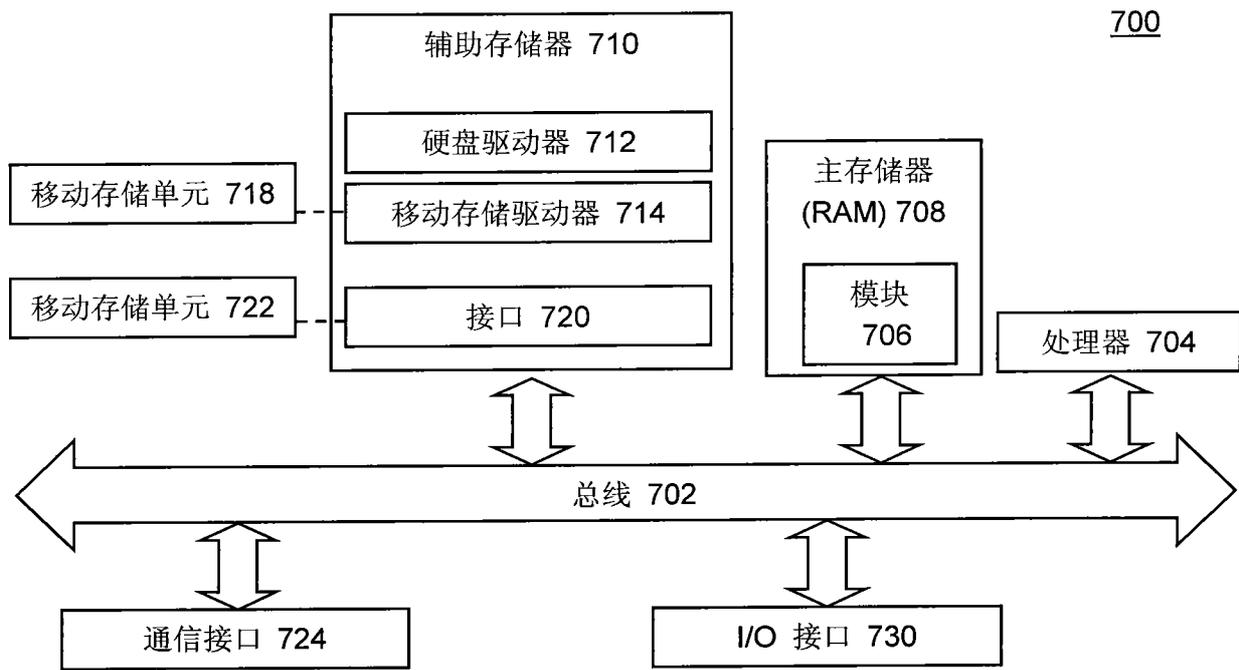


图 7