进化策略在无比例工程图布局优化中的应用

李江涛 刘静华 何 涛

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083) (中国科学院 计算技术研究所, 北京 100080)

摘 要: 自动生成的无比例工程图存在布局不合理、可读性差的问题, 以管线安装图为例分析了工程图中布局的约束条件, 将布局问题简化为管段长度的调整, 基于目标分解建立了多目标优化的数学模型. 应用进化策略求解非线性规划的数学模型, 讨论了进化策略中问题的表达、重组、突变、选择算子以及终止条件. 计算结果表明, 此法可以很好地满足工程中对图纸可读性和出图效率的要求, 并可推广到一般的具有拓扑连接关系的布局优化问题中去.

关 键 词: 无比例工程图; 布局优化; 进化策略

中图分类号: TP 391.7

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2007)03-0366-04

Application of evolutionary strategy in layout optimization of non-scale engineering drawing

Li Jiangtao Liu Jinghua

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

He Tao

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The problem of unscientific layout and inferior readability currently exists in the non-scale engineering drawing which is generated automatically. Constraint conditions of engineering drawing were analyzed taking pipeline assemble drawing for example. The layout problem was simplified into the length adjustment of pipeline segment, and a multi-object optimization mathematical model was raised based on objects decomposing. Applying evolutionary strategy to solve the non-linear programming mathematical model, the express of layout problem, the operators of recombination, mutation, selection and termination condition were discussed. Results indicate that this method can meet the needs of readability and efficiency of real project, and also can be generalized into other layout optimization which has topological connections.

Key words: non-scale engineering drawing; layout optimization; evolutionary strategy

利用 CAD 进行设计最终呈现给用户的是各种各样的工程图纸. 这些图纸是用户用来进行最后施工存档的重要依据, 是设计结果的最终表示, 它是否满足用户的要求直接影响到设计审核和工程施工, 也直接影响到该工程 CAD 软件的前途.

CAD的设计对象有 2 大类: 一类是工程设计, 另一类是产品设计[1]. 在工程设计领域, 因为各个图元代表的物体的实际尺寸可能相差悬殊, 如果采用单一比例尺将导致无法有效绘制图面上的所有元素. 例如在工厂设计中一根管线可能长达数十米甚至上百米, 而管线上的阀门则通常只有几十厘米, 显然, 按照统一比例绘制是不实际的. 因此在实际的施工和工程规范中, 都要求绘制出图纸必须是无比例适当变形的, 这样在有限的图形区内可以很直观地描述出繁杂模型中各物体间相对关系, 而且图面协调易于标注尺寸.

本文以工厂设计中的管线安装图 (ISO 图) 为例对无比例工程图的布局问题进行讨论.

收稿日期: 2006-01-22

作者简介: 李江涛 (1980 –), 男, 山东莱州人, 硕士生, lij@me.buaa.edu.cn

1　管线安装图布局优化意义及难点

配管设计是化工及石化领域工厂设计的一个重要组成部分, 如何能精确、高效地提高配管设计是整个工厂设计质量的核心所在.

ISO 图为单根管线的无比例等轴测图, 要求图纸布局美观、元件之间关系表达清晰、不干涉. 然而, 通过从三维模型到二维图纸的简单映射导致的遮挡、碰撞严重影响 ISO 图的质量, 往往使一张图纸失去参考价值, 并大大增加了设计人员的工作量, 降低了 CAD 软件的实用性, 如图 1.

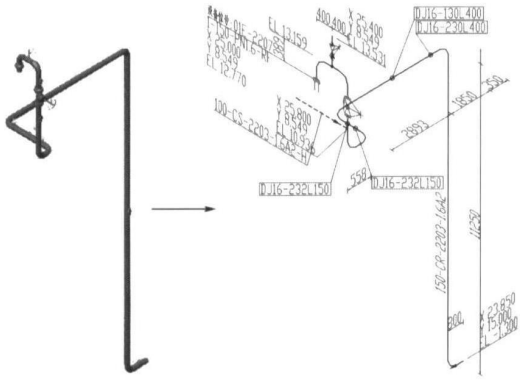

图 1　简单映射的管线安装图

由于工程图对拓扑关系约束要求严格, 并且某些模型 (比如管道)的长度具有可变性, 使得现有算法无法应用于实际的无比例工程图布局, 同时图纸的自动布局和自动标注都是 NP 难问题[2], 因此无比例工程图自动生成过程中图面布局的规则和约束都是值得深入研究的.

2　管线安装图布局问题的数学描述

2 1　拓扑有限变形图

一个图形 G 中的实体集 S 在拓扑保持的情况下发生限制在约束集合 $\{F_i\}$下的几何变形 $M: S \rightarrow S'$, 称为拓扑有限变形; 新生成的图 G'称为图 G 在约束集合 $\{F_i\}$下的拓扑有限变形图[3].

由于无比例工程图主要描述的是工程设计中各个元件、设备、管线等的拓扑连接及位置关系, 而并不关心某个零件的具体结构, 因此布局调整实际上是在拓扑有限变形的基础上进行优化, 管线安装图为一种拓扑有限变形图.

2 2　布局规则和约束条件

解决一个优化布局问题, 首先需要分析影响布局设计的基本规则和约束, 并较为准确地建立描述布局问题的数学模型, 再通过对布局模型求解找到最优 (或较优)的布局方案[4].

以方便施工为最终目的, 无比例工程图的布局应满足如下的规则:

1) 保持原有设计的拓扑关系及方位不变;

2) 形变的有限性和整体性, 即在无统一比例的前提下应该尽量保持原有的几何比例;

3) 表达清晰, 减少遮挡干涉;

4) 预留尺寸标注的空间.

由于布局求解过程的实质就是布局约束的处理和使用, 所以布局约束在布局求解中起着非常重要的作用. 根据上述规则, 可以将约束简单地分为硬约束和软约束 2类[5]. 所谓硬约束是指布局中必须被绝对满足的约束, 硬约束如果被违犯, 则布局失败. 软约束是指在一定程度上被满足的约束, 对应于通常所说的目标函数.

具体的, 硬约束包括: ①位置约束, 即图形不能超出绘图区, 同时应预留尺寸标注的空间, 使标注能合理分布在绘图区内; ②拓扑方位约束, 即二维工程图应保持三维模型连接关系、角度关系, 如应保持环路的闭合, 平行管线仍旧平行等; ③最大最小约束, 由于图纸空间的有限性, 图面上所有要表达的图元需要有一个合理的大小, 既要能够容纳下标注信息, 也不能侵占其它图元的空间. 软约束包括: ①尽量充满图面, 同时应位于绘图区中间; ②尽量保持三维模型间的比例关系; ③尽量减少无拓扑连接关系各图元间的碰撞.

2 3　布局问题的数学模型

根据上面对布局约束的分析, 应用目标分解的建模方法建立数学模型, 即对应于软约束分别建立数学子模型, 并根据布局方案调整各个子模型的权系数, 同时将硬约束建立为等式或不等式的约束条件, 最后形成一个多目标的布局优化求解问题.

在管线安装图中, 管段是管线中方向没有改变的一段, 即管段中不存在拐点及分支点. 在无比例管线图中, 布局问题的实质是确定各管段的长度, 管段长度如果合适, 则整个图纸的布局就显得美观大方, 反之则影响到读图的方便性. 同时, 根据管线图的特点, 本文将三维模型抽象为一棵三叉树, 树的结点为管段的端点, 管段的方向 $\boldsymbol{d}_i$ (根据管线实际方向经投影变换得出)、计算长度 L_{ci} 记录在结点指针中. 根据上面分析依次建立规划的约束条件及目标函数.

设管线图中根节点为 $\boldsymbol{P}_0$, 则由拓扑关系, 图中任一点 $\boldsymbol{P}$ 可表示为

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}_0 + \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{d}_i L_{ci} \qquad (1)$$

设图纸的边界为 $[(X_{min}, Y_{min}), (X_{max}, Y_{max})]$, 则位置约束为

$$\boldsymbol{P}_0 + \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{d}_i L_{ci} \in [(X_{min}, Y_{min}), (X_{max}, Y_{max})] \tag{2}$$

环路约束为

$$\sum_i \boldsymbol{d}_i L_{ci} = 0 \tag{3}$$

最小管长约束为

$$L_{ci} \geqslant L_{mi} + kL_{min} \tag{4}$$

式中, L_{mi}是该管段上固定不变的线段长度; k是可变长线段的数目; L_{min}是最小管长限制.

根据工程经验, ISO 图中管段的期望长度为 $\lambda \sqrt[4]{L_i}$. 其中 λ为缩放系数, 计算式为

$$\lambda = g(L_{ci}) = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{L_{ci}}{\sqrt[4]{L_i}} \right) \Big\backslash n$$

即图纸整体的缩放系数为各管段缩放系数的算术平均数. 由于最小二乘法能够通过最小化误差的平方和找到一组数据的最佳函数匹配, 而这个特性恰恰符合软约束 ②中对于管长的要求, 所以采用最小二乘法来表达此约束. 出于多目标间优化平衡的目的, 本文最后对最小二乘法进行了变形. 因此, 软约束条件中的 ①和 ②可表示为

$$\min\left(-\mu\lambda + \sum_{i=1}^{n} \left| L_{ci} - \lambda \sqrt[4]{L_i} \right| \right) \tag{5}$$

式中 μ为权系数, 根据实验结果可取 1.

当管线较复杂时采用统一比例由三维投影到二维将不可避免地发生遮挡干涉, 而无比例工程图通过调整不同管段的长度可以有效地避免碰撞, 提高工程图的可读性.

根据工程需求以及描述和定量计算的方便, 同时预留标注的空间, 本文采用动态碰撞检查, 将 ISO 图中可能发生的干涉进行分类, 并按影响的大小分别赋予权值, 通过碰撞检测累计出碰撞量作为优化的目标之一.

$$C = \sum_j \alpha_j n_j \tag{6}$$

式中, C 为碰撞量; α_j 为第 j种碰撞的权值; n_j 为此类型碰撞发生的次数. 综上, 优化求解的数学模型变为

$$f = \min\left(-\lambda + \sum_{i=1}^{n} \left| L_{ci} - \lambda \sqrt[4]{L_i} \right| + \gamma \sum_j \alpha_j n_j \right) \tag{7}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} L_{ci} \geqslant L_{mi} + kL_{min} \qquad i = 1, 2, \cdots, n \\ \boldsymbol{P}_0 + \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{d}_i L_{ci} \in [(X_{min}, Y_{min}), (X_{max}, Y_{max})] \\ \sum_i \boldsymbol{d}_i L_{ci} = 0 \end{cases}$$

式中, γ为权值. 这是一个非线性、非连续的多目标优化问题.

3 进化策略求解

传统的数值优化算法不仅要求函数连续、可导, 而且对其一阶导数及二阶导数都有要求. 式 (7)为一个非线性规划问题, 模型的非线性、非连续使之不可能用传统的优化算法进行求解.

进化策略从一组随机生成的初始个体出发, 经过重组、突变、选择等操作, 并根据适应度大小进行个体的优胜劣汰, 提高新一代群体的质量, 再经过多次反复迭代, 逐步逼近最优解, 具有智能性和本质并行性的显著特点. 从数学角度讲, 进化算法实质上是一种搜索寻优的方法[6]. 进化策略通常采用实数编码, 广泛应用于各种非线性规划的求解中.

3.1 问题的表达

个体由目标变量 $\boldsymbol{X}$ 和标准差 σ 两部分组成, 每部分又有 n个分量.

$$(\boldsymbol{X}, \sigma) = ((x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n), (\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_i, \cdots, \sigma_n)) \tag{8}$$

本文中, 每个个体对应于一种布局, 目标变量 x_i对应于管段的计算长, 即 L_{ci}; σ 给出如何变异 $\boldsymbol{X}$ 以及它本身如何变异的指令. $\boldsymbol{X}$ 和 σ 的关系是

$$\left.\begin{aligned} \sigma_i' &= \sigma_i \cdot \exp(\tau' \cdot N(0, 1) + \tau \cdot N_i(0, 1)) \\ x_i' &= x_i + \sigma_i' \cdot N_i(0, 1) \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

式中, (x_i, σ_i)为父代个体的第 i个分量; (x_i', σ_i')为子代新个体的第 i个分量; $N(0, 1)$为服从标准正态分布的随机数; $N_i(0, 1)$为针对第 i个分量重新产生一次符合标准正态分布的随机数; τ'为全局步长系数; τ为局部步长系数.

式 (9)表明, 新个体是在旧个体基础上随机变化而来.

3.2 初始群体的产生

进化策略中初始群体由 μ个个体组成, 每个个体 $(\boldsymbol{X}, \sigma)$内又可以包含 n个 x_i和 σ_i分量. 产生初始个体的方法是随机生成, 可以从某一初始点 $(\boldsymbol{X}(0), \sigma(0))$出发, 通过多次突变产生 μ个初始个体, 该初始个体从可行域中用随机方法选取.

3.3 适应度计算

在传统的带约束的数值优化计算中可将约束条件 (硬约束)作为罚函数置于目标函数中, 而进化策略中对于约束条件的处理, 主要是采用重复试凑法. 每当新个体生成, 将其代入约束条件中检

验是否满足约束条件. 若满足, 则接纳新个体; 否则, 舍弃该新个体, 借助重组、突变而产生另一个新个体.

3.3 重　组

进化策略中的重组 (recombination)算子是以 2个父代个体为基础进行信息交换. 在本文中对于目标变量 X 用离散重组, 对于策略因子 σ用中值重组.

目标变量的离散重组:

$$x_i = x_{S,i} \text{ 或 } x_{T,i}$$

策略因子的中值重组:

$$\sigma_i = \sigma_{S,i} + \kappa(\sigma_{T,i} - \sigma_{S,i})$$

式中, S 和 T 表示随机地从种群中选取的 2个父个体; κ是一个 [0, 1]上的均匀分布的随机变量.

3.5 突　变

进化策略的突变是在旧个体基础上添加一个随机量, 从而形成新个体. 突变的过程同式 (9), 其中系数 τ′, τ可按式 (10)计算:

$$\left.\begin{aligned}\tau &= \left(\sqrt{2\sqrt{n}}\right)^{-1}\\ \tau' &= \left(\sqrt{2n}\right)^{-1}\end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

式中 n 为个体中所含分量数目.

τ′及 τ对于随机量 $N(0, 1)$进行缩放, 它们相当于人工神经网络中的"学习率".

3.6 选　择

进化策略中的选择是确定型操作, 它严格根据适应度的大小, 将劣质个体完全淘汰.

本文采用的 (μ, λ)选择是从 λ个子代新个体中确定性地择优挑选 μ个个体 (要求 μ< λ)组成下一代群体, 每个个体只存活一代, 随即被新个体顶替.

3.7 终　止

进化策略经过多次的迭代进化, 算法逐渐收敛. 针对进化策略, 本文采用群体个体适应度的方差来决定算法是否终止. 一旦方差小于极限值, 则令算法终止. 这种终止条件可表述为

$$S^2 \leqslant \zeta \qquad (11)$$

式中, $S^2 = \frac{1}{n}[(x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2) - n\vec{x}]$为群体适应度的方差; ζ为大于 0的定值, 文中取 10^{-3}.

4 优化结果

对图 1的管线进行布局优化后得到的 ISO 图如图 2, 遮挡重叠现象完全消失且布局美观大方, 图纸的可读性得到明显改善. 通过对大量模型进行布局优化, 统计数据表明, 本文算法全局寻优效果较好, 可以达到 90% 以上的全局最优率, 图纸干涉量平均降低了 85. 68%, 布局优化的时间与模型的大小总体上成线性关系.

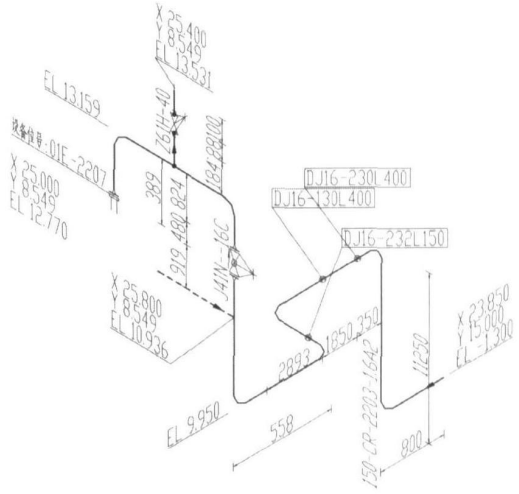

图 2　优化后的 ISO 图

5 结 束 语

本文根据工程需求, 分析了无比例工程图的约束条件, 提出了布局优化的数学模型并用进化策略进行求解. 实践证明, 本文建立的数学模型及求解策略能够高效地满足工厂设计软件对图纸生成的自动化要求, 生成的图纸布局良好, 可读性高, 修改率符合设计要求. 同时, 本文中的建模及求解方法可以推广到一般的具有拓扑连接关系的布局问题中, 具有很强的适应性.

进化算法具有渐进总体收敛性[7], 但由于工程图纸自动生成特别是成批生成的时间有限, 进化算法是一种随机搜索寻优算法, 因此在进化过程设置一个最大进化代数以保证任务及时完成, 但这样也导致了优化结果的不稳定. 收敛速度及稳定性仍然是一个需要解决的问题.

参考文献 (References)

[1] 唐荣锡. CAD/CAM 技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994
Tang Rongxi. CAD/CAM technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1994(in Chinese)

[2] Matks J, Shieber S. The computational complexity of cartographic label placement[R]. Technical Report CRCT-05-91, 1991

[3] 何涛. 工程图纸自动生成优化算法研究 [D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 1999
He Tao. Research of optimized algorithm of engineering drawing auto-generation[D]. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, 1999(in Chinese)

(下转第 374页)

科机器人系统的定位精度最大值为 1.67mm, 平均值为 1.00mm, 较视觉伺服以前有了明显的提高; 采用视觉伺服后, 系统定位误差与病灶点的空间映射误差相差不大, 说明此时系统定位误差主要由病灶点空间映射误差引起, 机器人绝对定位误差对系统定位误差的影响已经不大.

4 结束语

本文用视觉伺服的方法提高了脑外科机器人的系统定位精度. 用自制的模型模拟病人头部, 对整个手术过程进行了模拟; 用高精度的 FARO 三坐标测量臂分别对双目视觉定位精度、病灶点空间映射精度、视觉伺服前和视觉伺服后的系统定位精度进行了测量. 结果表明, 采用视觉伺服的方法后, 系统的定位精度最大值为 1.67mm, 平均值为 1.00mm, 较视觉伺服前的系统定位精度有了明显的提高; 采用视觉伺服后, 系统定位误差主要由病灶点映射误差引起, 机器人绝对定位误差对系统定位误差影响不大.

参考文献 (**References**)

[1] Kwoh Y S, Hou J, Jonckheere E A, et al. Robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1988, 35(2): 153-160

[2] Shen Weimin, Gu J, Milios E. Robotic neurosurgery and clinical applications[C]//Proceedings of 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation. New York: IEEE, 2004: 114-119

[3] Maciunas R J, Galloway R L Jr, Latimar J W. The application accuracy of stereotactic frames[J]. Neurosurgery, 1994, 35(4): 682-695

[4] Li Q H, Zamorano L, Pandya A, et al. The application accuracy of the neuromate robot: a quantitative comparison with frameless and frame-based surgical localization systems[J]. Computer Aided Surgery, 2002, 7: 90-98

[5] Morgan P S, Carter T, Davis S, et al. The application accuracy of the pathfinder neurosurgical robot[EB/OL]. London: Armstrong Heathcare Ltd, 2003. http://www.armstrong-healthcare.com

[6] Fitzpatrick J M, West J B, Maurer C R Jr. Predicting error in rigid-body point-based registration[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1998, 17(5): 694-702

[7] Ziegert J, Datseris P. Basic considerations for robot calibration[C]//Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1988: 932-938

[8] Hutchinson S, Hager G D, Corke P I. A tutorial on visual servo control[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(5): 651-670

[9] Liu Junchuan, Zhang Yuru, Wang Tianmiao, et al. Neuromaster: a robot system for neurosurgery[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2004: 824-828

(责任编辑: 文丽芳)

(上接第 **369**页)

[4] 曹斌, 谭建荣, 伊国栋. 管线布局设计的约束因素分析及建模方法研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(15): 1318-1323
Cao Bin, Tan Jianrong, Yi Guodong. Analysis of constraint factors and research on modeling method of pipeline packing design[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(15): 1318-1323(in Chinese)

[5] 王金敏, 王玉新, 查建中. 布局问题约束的分类及表达[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(5): 349-354
Wang Jinmin, Wang Yuxin, Cha Jianzhong. Classification and representation of constraints in packing problem[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(5): 349-354(in Chinese)

[6] 云庆夏. 进化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000
Yun Qingxia. Evolutionary algorithms[M]. Metallurgical Industry Press, 2000(in Chinese)

[7] Fogel D B. Asymptotic convergency properties of genetic algorithms and evolutionary programming: analysis and experiments[J]. Cybernetic and Systems: An Int J, 1994, 25(3): 389-407

(责任编辑: 文丽芳)