arXiv:2603.07573v1 [physics.optics] 8 Mar 2026

利用田口方法优化光纤中的非线性脉冲传播

ADIT Y, [1,2] 和SRIKANTH SUGAVANAM, [1,*]

[1] *Pratibimb* 光子学实验室，*IIT Mandi* 计算与电气工程学院，*Kamand*，喜马偕尔邦 - *175005*，印度[*]*ssrikanth@iitmandi.ac.in*

摘要：对光纤中非线性脉冲传播细微特性的理解，推动了其在光通信、传感和生物光子学等领域的一系列重要应用。在这方面，采用恰当的优化策略以达到所需的性能参数至关重要。本文介绍田口方法，将其作为优化光纤中非线性脉冲传播的有效工具。我们表明，利用正交表能够快速收敛至目标脉冲参数；若侧重利用而非探索，收敛速度还会更快。我们以该领域两个著名问题——导引中心孤子和色散递减光纤中的孤子阶数守恒——为例，展示这一方法的应用，凸显其主要特点，以及其在非线性脉冲传播问题中发现解的潜力。

1. 引言

光脉冲在光纤中的传播是一个多参数非线性问题，其中光脉冲与光纤介质的相互作用受脉冲特性、材料和光纤色散、材料非线性以及相互作用长度的影响。非线性光谱混频和散射相互作用进一步增加了相互作用的复杂性；它们与噪声共同作用，可导致多种多样的运行状态，从一端的自组织行为到另一端的混沌行为。此类复杂行为的典型例子包括呼吸子的形成、怪波 [1, 2], 超连续谱产生 [3],，以及光纤激光器 [4]。分析或数值研究通常会揭示相互作用的复杂性，其中包括微扰方法等技术 [5]。然而，尽管此类方法能提供有益的见解，但将其应用于实际系统时，高阶相互作用无法忽略，因而在数学上颇具挑战。此外，参数空间的高维特性也使其难以探索，因此需要采用先进的研究方法。

的确，近年来，随着可用计算能力的提升，优化技术和基于学习的方法日益广泛地得到应用，从而促进了在此类高度多维参数空间中发现解。例如，遗传算法和粒子群优化等技术已用于优化光通信链路的性能 [6–8], 寻找光纤激光器的合适运行参数 [9]以及微梳 [10]。同样，人们对利用人工智能（AI）和基于机器学习的方法进行仿真和发现解的兴趣日益浓厚 [11, 12]。然而，在计算时间、计算能力、解的收敛和可解释性方面仍然存在挑战。人工智能和机器学习方法需要生成足够多样的数据集，以训练底层学习架构，这也增加了对计算资源和存储的需求。同样，尽管优化技术不一定需要创建或存储数据集，但遗传算法所采用的全局搜索策略可能导致收敛时间过长。此外，许多此类优化

[2]现地址 - 纳米科学与工程中心（CeNSE），印度科学研究院，班加罗尔-560012。

技术本质上属于启发式方法，这意味着即使采用相同的初始种子参数，每次运行最终收敛得到的数值也会略有不同。最重要的是，人们日益担忧此类活动越来越多地采用数据密集型和计算密集型方法，因为这会直接影响环境 [13]。因此，越来越需要寻找内存和计算高效的技术，以帮助有效探索此类高度非线性、多维的参数空间，从而搜索有利的解，并有望发现新的解。

本文展示了田口方法作为研究光纤中非线性脉冲传播的一种可行优化方法。田口玄一于20世纪80年代首次提出该方法，将其作为工业过程优化的工具 [14], ；田口方法根植于统计学中的实验设计（DoE）理论。该技术的优势在于利用正交数组，大幅减少确定不同实验因素贡献所需的实验运行次数 [15]。在光子学领域，田口方法已广泛应用于激光加工 [16, 17] 和光学传感器设计 [18, 19], ；对该技术进行改进后，也被用于天线设计优化 [20], 以及光通信链路设计 [21]。然而，迄今为止，该技术在光纤非线性脉冲传播中的适用性尚未得到验证。

下文将首先阐述田口方法的基础，然后介绍其作为优化技术的应用。接下来，我们将借助非线性脉冲传播领域两个广为人知的问题——导引中心孤子，以及色散递减光纤中的孤子传播——说明如何将脉冲传播问题重新表述为田口问题。随后，我们将讨论田口方法的主要特征、适用范围，以及其在此类非线性脉冲传播问题中的应用潜力。

2. 田口方法

在田口框架的术语中，响应（即任何实验的结果）由实验变量之间的相互作用决定，这些变量称为因素。因素可以取不同的数值，称为水平；水平可以是连续的，也可以是离散的。理想情况下，最好进行全因子实验，即验证因素所有可能水平排列组合下实验的响应。然而，如果实验涉及的因素和／或水平数量相当多，这种方法很快就会变得难以实施。

基于试验设计（DoE）的田口方法 [15] 采用部分因子法，仅进行全因子实验的一个子集。该方法的核心是使用正交表（OA），以实现不同因素各水平的均衡组合。具体而言，数组的每一列都是均衡的，即所有水平出现的次数相同。此外，还可以设计正交表，使行的成对、三元或更高阶组合达到均衡，从而使这些行之间按行组合的取值不会重复。这称为正交表强度。相应地，一个具有 k 个因素、 s 个水平、成对均衡且包含 M 行的正交表，可用符号 $OA(M,\ k,\ s,\ 2)$ 表示。通常选择 3 水平正交表来定义一个中心平均水平，这也便于使用优化程序。针对不同因素、水平和强度组合设计正交表，其基础是伽罗瓦理论 [22], ；相关表格资料广泛可得（例如参见 [23]）。

图 1 展示了采用 $OA(9,\ 3,\ 3,\ 2)$ 实施三因素三水平实验的田口方法工作流程。正交表的每一行代表一次实验运行，并产生相应的响应。根据对实验的先验知识，确定因素的最大和最小水平 v_{max} 和v_{min}，进而用于定义水平差 LD_i。随后利用这些水平差初始化各因素的 s 水平，具体定义如下

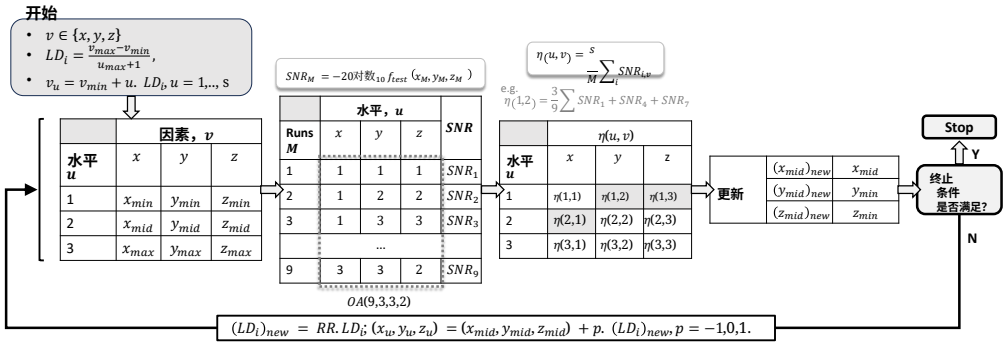


图1. 三参数三水平实验的田口方法工作流程。

k 因素 v，其定义为

$$v_u = v_{min} + u.LD_i, u = 1, ..., s, \tag{1}$$

其中

$$LD_i = \frac{v_{max} - v_{min}}{s + 1}. \tag{2}$$

每个实验的响应都可以通过响应函数 $f_{test}(v)$ 量化。田口方法将响应定义为**N**型（望目特性）、**S**型（望小特性）或**L**型（望大特性） [24], , 具体类型取决于所监测过程的性质。这类似于在优化问题中定义目标函数，即根据关注的问题和解来确定适当的响应函数。然后，按照田口惯例将其转换为对数度量——

$$SNR_M = -20 \log_{10} f_{test}(v_M). \tag{3}$$

f_{test} 通常定义为使目标响应值较小，从而使上述定义的信噪比（SNR）较大。随后，通过对正交表中所有包含因子 v 处于水平 u的行的信噪比值取平均，构建响应表 $\eta(u, v)$。流程图展示了 $\eta(1,2)$ 的此类计算示例。由于正交表的各行是均衡的，因此，只需对包含给定因子处于特定水平的所有行取平均值，即可得到该因子特定水平 u 的贡献。因此，对于给定因子 v，使 $\eta(u, v)$ 达到最大值的水平 u，即被选为对应因子 v的水平，以获得所期望的最优响应。

针对非线性脉冲传播问题，我们采用上文所述的田口方法的一种改进，将其转化为优化程序 [20]。本质上，在完成第一组实验运行次数后，将响应表中产生最大响应的水平选为新的中心水平。围绕这一新的中心水平，利用修正后的水平差因子 $LD_i \times RR_i$定义较高水平与较低水平，其中 RR_i 称为缩减率。 RR_i 被选为小于1，从而使搜索的参数空间在后续迭代次数中逐渐缩小。该过程反复迭代多次，直至达到期望响应（**L**型、**S**型或**N**型），或者连续迭代次数之间的响应差值小于预定义的容差。如下文将要表明的，响应的定义因此对于有效探索参数空间至关重要，而缩减率则决定了探索的程度以及收敛至期望最优解的速率。

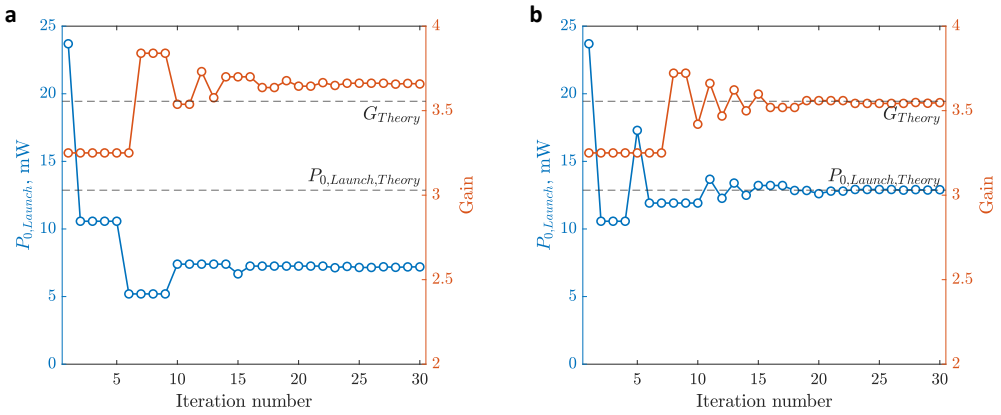


图2. 使用田口方法对导引中心问题进行求解时获得的收敛结果，其中 $RR = 0.8$ 对应 a. $N_0 = 1$，b. $N_0 = 1.3285$。

3. 结果

3.1. 导引中心孤子问题

为说明如何运用田口方法优化非线性脉冲传播，我们首先考虑导引中心孤子的情形。在光纤中，孤子是一种自组织的非线性光脉冲特征，其形状借助色散与非线性的平衡而得以保持。这些特性曾使它们成为光通信的理想候选者，然而实际中的光纤损耗限制了其适用性，因而需要分布式或周期性放大方案。导引中心孤子方法 [25,26] 便是此类研究的结果；其中表明，在特定的入射功率与周期性放大条件下，可以实现保形孤子的平均解，从而使孤子在每个放大器之后立即得到周期性再生。具体而言，研究表明，对于给定的周期性放大器间距 L_A （$\ll$ 色散长度 L_D），可通过选择增益 G_{Theory} 以及入射孤子峰值功率 $P_{0,Launch,Theory}$ 来维持阶数为 $N \approx 1$ 的孤子，即

$$G_{Theory} = \exp(\alpha L_A), P_{0,Launch,Theory} = \frac{G_{Theory} \ln G_{Theory}}{G_{Theory} - 1} P_0, \tag{4}$$

其中， P_0 是给定光纤中一阶孤子的峰值功率。式4表明，增益基本上补偿了孤子在每个光纤段中产生的损耗，而入射功率 $P_{0,Launch,Theory}$ 是增益的直接函数。

增益与孤子发射功率之间的关系最初是通过微扰方法建立的。为应用田口方法，我们重新表述这一问题，首先假设放大器的增益 G 与孤子发射功率 $P_{0,\ Launch}$ 之间不存在关系。也就是说，我们将 G 和 $P_{0,\ Launch}$ 视为实验因素，目标是找出它们的适当组合，使孤子在经过每个放大器后都能周期性地再生。随后，通过模拟入射孤子在由 M_{amp} 个等间距放大器组成的配置中的传播，确定实验结果。为此，针对相应的实验因素，采用相位容差为 10^{-5} 的自适应分步傅里叶变换算法。入射脉冲采用强度半高全宽为 50 ps 的双曲正割脉冲。光纤的群速度色散（GVD）为 -7650 fs^2/m，损耗为 $\alpha = 0.2611$ dB/km，非线性为 $\gamma = 1.3\ W^{-1}km^{-1}$。放大器间距取为 $L_A = 0。2 \times L_D$，其中 $L_D = 105。5$ km。传播总距离设为 200 km。根据公式 4，对于这些传播参数

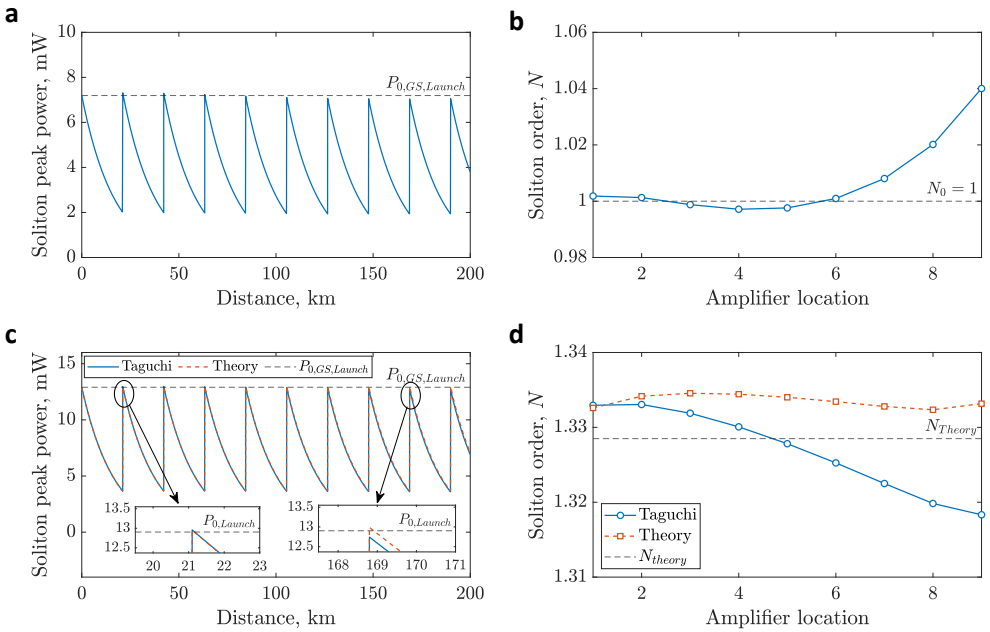


图3. 使用田口方法得到的导引中心孤子的传播特性：a、b. $N_0 = 1$；c、d. $N_0 = 1.3285$。各放大器位置之后的孤子阶数（图b、d）接近目标值 N_0。橙色点线图（图c、d）和插图显示了采用理论增益值和入射功率，通过分步法得到的结果，以供比较。

$G_{Theory} = 3.5556$，$P_{0,\ Launch,\ Theory} = 12.87$ mW。随后将田口响应函数定义为

$$f_{test} = \sqrt{\frac{1}{M_{amp}}\left[\sum_{i=1}^{M_{amp}}(N_0 - N_i)^2\right] + \left(\frac{P_{0,M_{amp}} - P_{0,Launch}}{P_{0,Launch}}\right)^2 + \left(\frac{T_{0,M_{amp}} - T_{0,Launch}}{T_{0,Launch}}\right)^2}, \tag{5}$$

其中，N_i 指各放大器之后的孤子阶数，而（$P_{0,\ Launch}$，$T_{0,\ Launch}$）和（$P_{0,\ M_{Amp}}$，$T_{0,\ M_{Amp}}$）分别为入射端和最终放大器 M_{Amp} 处孤子的峰值功率和脉冲宽度。式5的响应函数定义为**N**形式，用于寻找阶数为 N_0 的孤子。该函数的其余两项用于避免收敛到平凡解（例如 $P_{0,\ Launch} = 0$，$G = 0$）。目前，N_0 设为1，以寻找接近一阶孤子的传播解。

虽然可以直接将入射端孤子的增益 G 和峰值功率$P_{0,\ Launch}$作为田口因子，但可以进行归一化，以保持各因素量级的一致性。这里，我们用当前配置下 $N = 1$ 孤子的峰值功率对峰值功率$P_{0,\ Launch}$ 进行归一化，从而得到归一化因子 P_{fac}，并将其用作田口因子。这与周期性放大器配置将支持 $N \approx 1$ 孤子传播的预期一致。此外，这使得两个因素 G 和 P_{fac}的初始参数搜索空间均可设为 [1, 10]。需要注意的是，与理论预期值相比，该搜索空间足够大，能够充分探索参数空间，并稳健地检验田口方法。

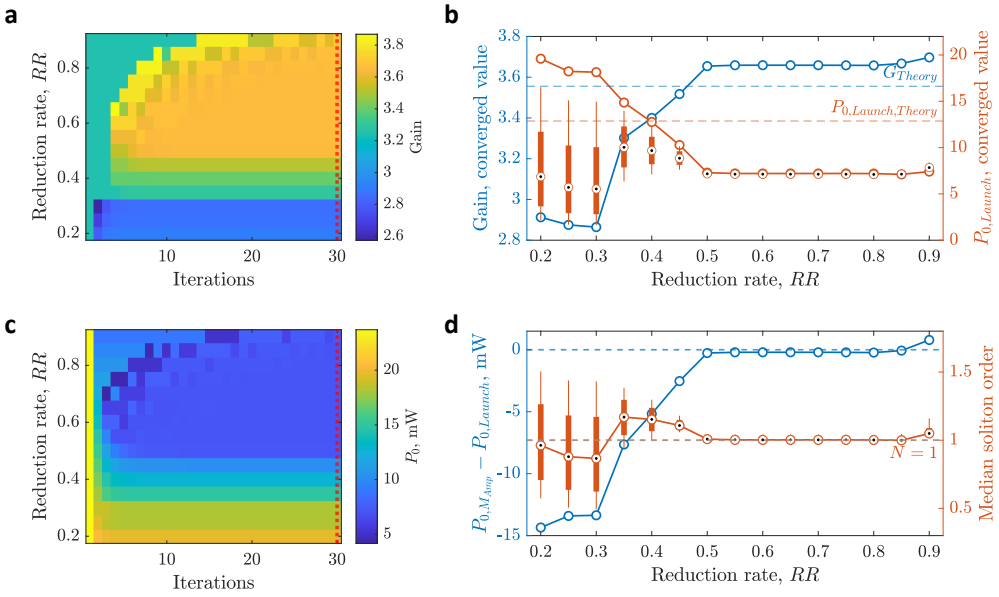


图 4. 使用缩减率 RR 和 $N_0 = 1$控制探索与利用。以缩减率为参数，展示增益 G 和孤子功率 $P_{0、Launch}$ 随迭代次数变化的收敛特性；b. 迭代 30 次后的收敛 G 和 $P_{0、Launch}$ 值；d. 入射孤子功率与最后一个放大器输出的孤子功率之差（左轴），以及各放大器间的孤子阶数中位数（右轴）。箱线图（图 b、d）展示了光纤链中每个放大器之后的孤子峰值功率和孤子阶数的分布。在一系列 RR 值下，峰值功率和孤子阶数特性的变化幅度较小，证实了该解具有导引特性。

使用正交表 $OA(9，2，3，2)$开展实验。实验运行完成后，通过汇总实验因素各水平的平均信噪比，生成响应表，从而确定新的中心水平。值得一提的是，针对双因素、三水平实验的正交表实际上对应一个全因子实验。尽管从实验设计的角度来看，这并不理想，但图 1 所示的田口优化仍然适用，所选示例也揭示了其若干重要特性。

图2a显示了通过设置$N_0 = 1$并采用缩减率 $RR = 0.8$，根据式5获得的响应函数结果，其中$P_{0,Launch} = P_0 \times P_{fac}$。基于田口方法的优化程序在约20次迭代后达到收敛，对应总计180次实验运行。与通常使用的遗传算法（GA）和粒子群优化（PSO）等优化算法相比，这种收敛速度更快；其他研究也报告了这一现象（例如 [21],另见补充信息）。这种加速可归因于田口方法的基于实验设计的方法，这与GA和PSO的随机初始播种条件形成对比。有趣的是，因素 G 和$P_{0,Launch}$ 的收敛结果偏离了理论预测结果。这是因为函数 f_{test} 寻求 $N = 1$ 解，而理论则假定入射的是 $N = 1.3285$阶孤子。事实上，在式5中设置 $N_0 = 1.3285$后，结果收敛至图2b所示的理论值。这表明，田口方法可以成为发现解的工具；在本例中，它有望通过增益 G 和孤子发射峰值功率$P_{0,Launch}$这两个维度调节孤子阶数。图3进一步验证了收敛的性质，其结果通过使用

自适应分步算法，在图2中所选 $N_0 = 1$ 和 $N_0 = 1.3285$的条件下，利用已收敛的增益和孤子发射功率对导引中心孤子进行传播获得。图3a、c显示了每个放大器位置之后孤子的周期性再生，这符合导引中心配置的预期；图3b、d则显示了两种情况下每个放大器之后的孤子阶数。对于 $N_0 = 1.3285$所获得的结果表明，田口方法能够充分接近预期的理论值，其精度符合实际精度和容差要求。通过选择更高的相位容差值（例如 10^{-6}, 10^{-8}），或为田口算法设置基于容差的终止条件，可以提高收敛精度。

缩减率 RR 在控制探索与利用之间的权衡方面发挥着重要作用。较大的缩减率（$RR \lesssim 1$）意味着因子空间的规模随迭代次数增加而缩减得较慢，从而为优化程序提供更大的搜索空间。因此，保持较大的缩减率有助于探索并发现全局极值。不过，这也会导致收敛时间更长。较小的缩减率有助于更快收敛，但可能导致局部解或解停滞。图 4 展示了通过改变 RR 和 $N_0 = 1$所得到的探索与利用特性。图 4a、c 展示了将 RR 调小如何加快收敛。图 4b 展示了在不同缩减率下，收敛至放大器增益 G 和孤子发射功率 $P_{0,\ GS}$ 的结果（图 4a 、 c 中的红色虚线）。此处，橙色箱线图反映了每个放大器之后孤子峰值功率的变化范围。这表明，对于导引中心孤子问题，即使缩减率低至 $RR = 0.5$，田口方法也能在短短 8 次迭代（72 次分步傅里叶模拟）内，在很宽的缩减率范围内收敛到一个 $N = 1$ 孤子解。图 4d 进一步展示了收敛特性：蓝色曲线（左轴）表示入射孤子与链中最后一个放大器输出的孤子之间的峰值功率差，橙色曲线（右轴）表示各放大器处的孤子阶数中位数，其值接近 $N = 1$ 。叠加的箱线图展示了收敛值对应的各放大器孤子阶数分布，这再次表明，收敛解在所有放大器处都呈现出一阶孤子的再生。结果表明，田口方法确实有助于发现理论预测之外的解，并且适用于实验验证。

3.2. 色散递减光纤

上述导引中心孤子问题示例凸显了基于田口方法的优化方法在快速收敛以及对探索与利用权衡的控制方面的优势。然而，由于它只是一个3水平、2参数问题，所得正交表对应于全因子实验设计。我们现在展示部分因子实验设计对色散递减光纤中孤子传播情形的适用性 [27,28]。在此类光纤中，沿光纤长度呈指数递减的色散平衡了沿光纤段长度由损耗引起的自相位调制减弱。理论上确定的色散曲线由下式给出

$$|\beta_2(z)| = |\beta_{2,0}| \exp(-\alpha z), \tag{6}$$

其中$\beta_{2,0}$ 为光纤在距离 $z = 0$处（即光纤入射端）的群速度色散， α 为光纤损耗参数。

为使用田口方法获得能够保持孤子阶数不变的合适色散曲线，我们将问题重新表述为求取色散曲线的泰勒级数系数，使其在距离的三阶以内保持正确。具体而言，光纤的群速度色散 β_2 被建模为如下形式的泰勒级数展开

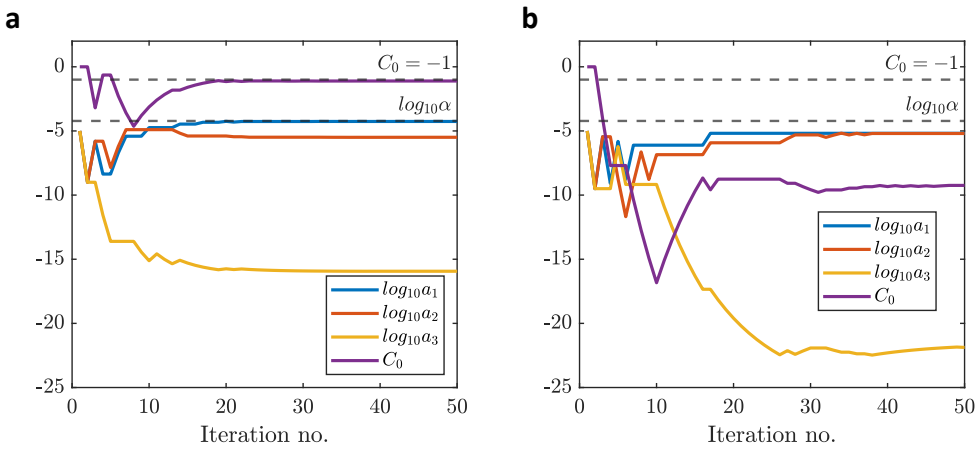


图5. 对于两种递减率，采用田口方法求解色散递减光纤问题所得的收敛特性；a. $RR = 0.8$，b. $RR = 0.9$。

$$\beta_2(z) = \beta_{2,0}\left[1 + C_0 a_1 z + \frac{(C_0 a_2)^2}{2!}z^2 + \frac{(C_0 a_3)^3}{3!}z^3\right], \tag{7}$$

其中，a_i 用于衡量系数的大小，而 C_0 则将该项的符号纳入考虑。相应地，可将响应函数建模为寻找一阶孤子解。为便于实现优化程序，还需执行另外两个步骤。首先，鉴于公式 7 具有幂级数的性质，可以预期系数 a_i 的数量级会有所不同。为避免这种情况，不采用 a_i，而是将对数缩放系数 $A_i = \log_{10}(a_i)$ 作为实验因素。其次，在色散定制光纤的整个跨度上，以周期性间隔 M_{loc} 测量孤子 N 的阶数，从而能够将响应函数定义为如下形式

$$f_{test} = \sqrt{\frac{1}{M_{loc}}\sum_{i=1}^{M_{loc}}(1 - N_i)^2} \tag{8}$$

因此，田口问题是寻找实验因素的取值——对数缩放系数 A_1, A_2, 和 A_3，以及系数 C_0 ——使其符合式8的响应函数所设定的约束。本文为该问题选择了形式为 $OA(9, 4, 3, 2)$ 的强度为2的正交表，从而针对4个因素在3个水平上的正交排列进行9次实验运行。因此，这构成了一个部分因子实验，使实验运行次数减少了9倍。

通过考虑 1 ps 双曲正割孤子在 10 千米距离上的传播，对色散定制光纤中的孤子传播这一物理问题进行了建模。光纤起始处的色散 $\beta_{2,0}$ 设为 -7650 fs^2/m。非线性设为 $1.3W^{-1}km^{-1}$。建模时采用相位容差为 10^{-6} 的自适应分步程序来模拟传播。A_i 和 C_0 的取值范围均设为 [-10, 10]。针对两种递减率，$RR = 0.8, 0.9$，考察了收敛结果。迭代次数上限设为 50，因此分步非线性薛定谔方程总共运行 450 次。此外，为了加快收敛，前四次迭代采用传统固定离散步长分步程序；若一开始就使用自适应步长程序，由于实验因素初始值较大，执行时间会异常长。

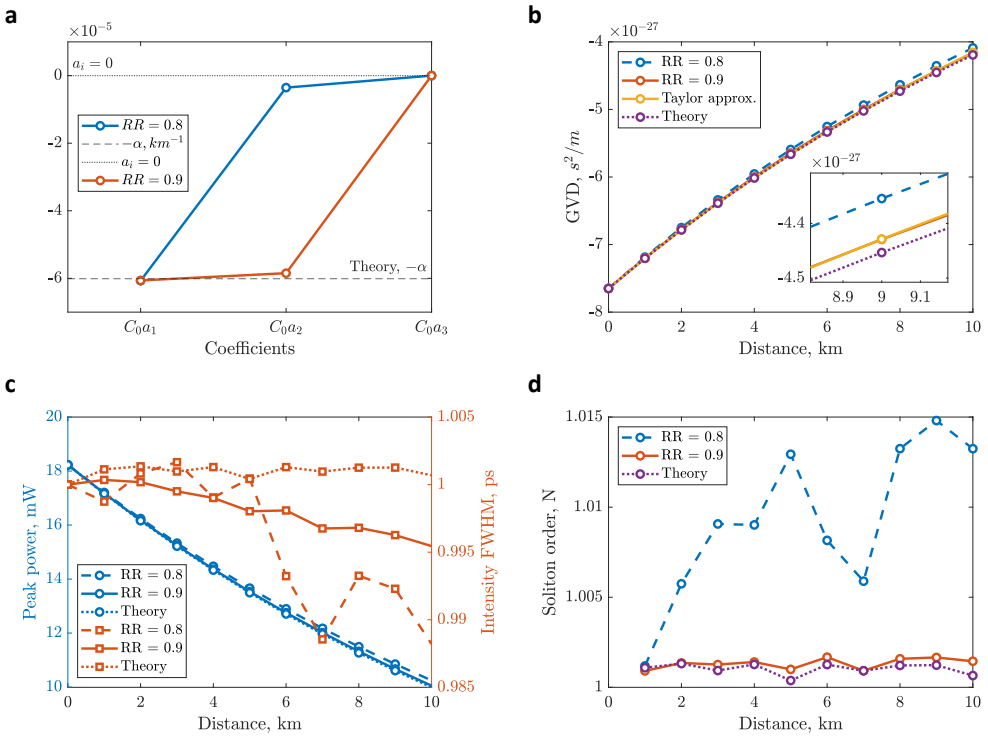


图6. 色散递减光纤问题收敛性的验证。a. C_0a_i 对于 $RR = 0.8$ 和 $RR = 0.9$ 的乘积项收敛性；b. 得到的色散曲线，插图显示理论结果与田口方法之间具有良好的一致性；c. 通过传播收敛解得到的结果，对孤子峰值功率和脉冲宽度进行比较；d. 孤子阶数变化，使用田口方法并取 $RR = 0.9$ 所得到的结果逐渐接近采用公式6的理论色散曲线得到的结果。

图5展示了采用田口方法确定两种递减率 $RR = 0.8,0.9$ 下光纤色散曲线的结果，并将其与理论已知解进行了比较。请注意，图中展示的是对数标度值 A_i 的收敛特性。对于 $RR = 0.8$，系数 C_0 和 A_1 收敛至理论预期值，而 A_2 和 A_3 则没有。对于 $RR = 0.9$，有趣的是，系数 C_0 和 A_i 均未收敛至理论预期值。然而，如图6a所示，在较高递减率下，相应的因素 C_0a_i 更接近理论预期值。这与我们的认识一致：较大的递减率允许更充分地探索参数空间，从而在满足所施加约束的情况下得到更好的估计。事实上，从图6b可以看出，田口方法所得结果与光纤理论预期的指数递减曲线高度吻合。此外，还展示了与理论指数色散相对应的泰勒级数展开，以比较近似的精度；在较大距离处可见轻微偏差（见插图）。田口方法得到的色散曲线在较大距离处存在微小偏差。尽管这些差异很小，图6c和 d 表明，即使是如此微小的差异也会影响演化特性。例如，若按照理论指数曲线考察脉冲演化，脉冲的强度半高全宽始终非常接近 1 ps 的入射脉冲宽度。在

相比之下，采用田口方法得到的色散曲线中，脉冲宽度随传播距离增加而减小。不过，差异完全处于实验限值范围内：在观测到的 10 千米传播范围内，对于 $RR = 0.9$，脉冲宽度的误差不超过 10 飞秒。同样，孤子阶数与理论预期值 $N = 1$ 非常接近，偏差主要源于色散曲线与理论曲线的偏离程度不同。图6d 展示了这一点，其中将 $RR = 0.9$ 对应的孤子阶数与公式6所给理论色散曲线对应的结果进行了比较。与导引中心孤子的情形一样，可以通过提高缩减率、增大自适应分步相位容差，以及增加迭代次数以实现更高精度的收敛来改善所得结果。此外，尽管收敛结果并非精确的泰勒级数系数值，但所得色散曲线与理论预测非常接近，因此能够得到最贴合的近似，从而有助于揭示此类介质中脉冲演化背后的物理机制。此外，结果表明，在所研究的传播距离范围内，二次色散曲线足以确保孤子阶数守恒。这些见解有助于简化制造过程并实现实验验证。

上述结果证明了基于部分因子设计的田口方法在优化非线性脉冲传播方面的适用性。这也表明，适当选择田口因子并对其相对幅值进行归一化，对于促进收敛至关重要。

4. 讨论

非线性光纤光学领域为我们今天所熟知的世界做出了巨大贡献，这一点在光通信、生物光子学和传感等领域尤为明显。除此之外，光纤平台还为研究基础非线性物理学提供了一个出色且用途广泛的实验室。上述田口方法为解决棘手的非线性问题以及推动解的发现增添了一种灵活的工具。其收敛速度快和采用部分因子设计这两项主要优势，可以显著降低对计算资源的需求，从而直接减少资源使用量和碳足迹。本研究选择导引中心孤子问题和色散递减光纤问题，是因为这两个问题广为人知且已有深入研究，同时也有助于突出田口方法的显著特征。借助更高维的正交数组，这里展示的原理和方法还可以扩展到其他高维问题，例如光纤激光器设计、超连续谱产生，甚至频率梳的优化。事实上，随着因素数量的增加，实验运行次数的缩减会变得更加显著。所展示的示例还凸显了参数选择和目标函数定义的重要性。鉴于其实现简单，在将设计的目标函数应用于更复杂且计算密集型的优化程序之前，可以先使用田口方法测试这些目标函数的有效性。尽管田口方法可以通过控制递减率实现探索与利用之间的权衡，但并不能保证收敛到全局极值。然而，这一问题并非田口方法所独有，而是在探索高维复杂问题的各种优化方法中普遍存在；此类问题需要进行额外测试，以验证收敛的性质。在此背景下，可以将田口方法作为第一步，随后通过采用更大的递减率并使用遗传算法和粒子群优化等其他优化程序进行验证；尽管这些方法耗时较长，但可以针对全局解进行搜索。

总之，鉴于其实现简便、采用部分因子法以及收敛特性快，田口方法为优化光纤中的非线性脉冲传播提供了一条替代途径。此外，成熟的统计试验设计领域还可提供更多工具，以增强其主要优势，从而

实现更为稳健的设计，而这正是田口方法的核心宗旨。

经费资助。 作者感谢科学与工程研究委员会授予的DST-CRG资助项目。该委员会是科学技术部（DST，印度政府）的法定机构。

致谢。 作者感谢 V. Balaswamy 博士、Siddhartha Sarma 博士和 Iqbal Ashraf 先生进行富有见地且卓有成效的讨论。

利益披露。 作者声明不存在利益冲突。

数据可用性。 本文所述结果的相关数据目前不公开，但可在提出合理请求后向作者索取。

参考文献。

1 J. M. Dudley、F. Dias、M. Erkintalo 和 G. Genty，《光学中的不稳定性、呼吸子与怪波》，《自然·光子学》，第 8 卷，第 10 期，第 755–764 页，2014年10月，792 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 220 2 1038 2014 . /nphoton. . . N. Akhmediev，《从无处涌现的波：复杂怪波结构及其基本粒子》，《物理学前沿》，第 8 卷，2021年1月，45 次引用（Crossref） [2025-05-05] 出版商：Frontiers。 [在线]。可访问：https://
www.frontiersin.orghttps://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2020.612318/full 3. A. Jose、S. D. Chowdhury、S. Balasubramanian、K. Krupa、Z. Wang、B. N. Upadhyay、P. Grelu 和 N. Kanagaraj，《类噪声脉冲种子驱动的超连续谱产生：高能平坦宽带光源的深入综述》，《激光与光子学评论》，第 19 卷，第 5 期，第 2400511 页，2025年，1 次引用（Crossref）[2025-05-05] _电子版：
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/lpor.202400511。 [在线]。可访问：
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10 202400511 4 1002. /lpor. . R. I. Woodward，《锁模光纤激光器的色散工程》，《光学杂志》，第 20 卷，第 3 期，第 033002 页，2018年2月，79 次引用（Crossref） [2025-05-05] 出版商：IOP Publishing。 [在线]。可访问：https://dx.doi.org/10 5 5 1088 2040 8986 9 2 . / - /aaa f . B. A. Malomed，《章节——非线性光纤光学及相关领域中的变分方法》，载于《光学进展》，E. Wolf 编。爱思唯尔，2002年1月，第 43 卷，第 71–193 页。 [在线]。可访问：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079663802800269 6. Simranjit Singh、Sonak Saini、Gurpreet Kaur 和 Rajinder Singh Kaler，《利用遗传算法对用于L波段密集波分复用系统的拉曼光纤放大器进行多参数优化》，《光学工程》，第 53 卷，第 1 期，第 016103 页，2014年1月，10 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 016103 7 1117 1 53 1 . / .OE. . . . H. M. Jiang、K. Xie 和 Y. F. Wang，《基于粒子群优化和平均功率分析技术的拉曼光纤放大器平坦增益谱设计》，《工程光学与激光》，第 50 卷，第 2 期，第 226–230 页，2012年2月，12 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816611002569 8. A. Redyuk、E. Shevelev、V. Danilko 和 M. Fedoruk，《机器学习辅助粒子群优化：用于光传输系统非线性补偿的基于扰动模型》，《光波技术杂志》，第 43 卷，第 5 期，第 2143–2150 页，2025年3月，1 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：
https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10737152 9. C. Lapre、F. Meng、M. Hary、C. Finot、G. Genty 和 J. M. Dudley，《利用遗传算法优化类噪声脉冲光纤激光器的宽带运行》，《科学报告》，第 13 卷，第 1 期，第 1865 页，2023年2月，12 次引用（Crossref）
[2025 05 05] [ ] 10 1038 41598 023 28689 8 - - 。在线。可访问：
10
https://doi.org/ . /s - - - . C. Mazoukh、L. Di Lauro、I. Alamgir、B. Fischer、N. Perron、A. Aadhi、A. Eshaghi、B. E. Little、S. T. Chu、D. J. Moss 和 R. Morandotti，《遗传算法增强的微梳态生成》，《通讯物理》，第 7 卷，第 1 期，第 81 页，2024年3月，10 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 0 11 1038 42005 024 01558 . /s - - - . H. Sui、H. Zhu、B. Luo、S. Taccheo、X. Zou 和 L. Yan，《基于物理的深度学习：光纤中非线性脉冲传播建模》，《光学快报》，第 47 卷，第 15 期，第 3912–3915 页，2022年8月，15 次引用（Crossref） [2025-05-05] 出版商：Optica出版集团。 [在线]。可访问：https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri = 47 15 3912 ol- - - . H. Sui、H. Zhu、H. Jia、Q. Li、M. Ou、B. Luo、X.
12
Zou 和 L. Yan，《通过轻量级卷积神经网络预测光纤中的非线性多脉冲传播》，《光学快报》，第 48 卷，第 18 期，第 4889–4892 页，2023年9月，5 次引用（Crossref） [2025-05-05] 出版商：Optica出版集团。 [在线]。可访问：https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri = 48 18 4889 ol- - - . 联合国环境规划署，《人工智能（AI）端到端：全面评估人工智能完整生命周期的环境影响势在必行——议题说明》，2024年9月。 [在线]。可访问：https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/46288
13

14. G. Taguchi 和 M. S. Phadke，《通过设计优化实现质量工程》，载于《质量控制、稳健设计与田口方法》，K. Dehnad 编。美国马萨诸塞州波士顿：Springer US，1989年，第 77–96 页。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 1007 978 1 4684 1472 1_5 . / - - - - . R. Kacker、E. Lagergren 和 J. Filliben，《田口正交表是经典试验设计》，《美国国家标准与技术研究院研究杂志》，第 96 卷，第 5 期，第 577 页，1991年9月，173 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/096/jresv96n5p577_A1b.pdf 16. T. Canel、A. U. Kaya 和 B. Çelik，《利用田口方法优化用于聚氯乙烯微钻孔的纳秒激光参数》，《光学与激光技术》，第 44 卷，第 8 期，第 2347–2353 页，2012年11月，60 次引用（Crossref） [2025 05 05] [ ] 0030399212001843 - - 。在线。可访问：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S . R. Sheshadri、M. Nagaraj、A. Lakshmikanthan、M. P. G. Chandrashekarappa、D. Y. Pimenov、K. Giasin、R. V. S. Prasad 和 S. Wojciechowski，《选择性激光熔化参数对提升表面质量和显微硬度特性的实验研究：田口方法与超排序概念方法》，《材料研究与技术杂志》，第 14 卷，第 2586–2600 页，2021年9月，40 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421008073 18. X. Chen、Y. Zhang、G. Pickrell 和 J. Antony，《光纤传感器开发中的实验设计》，《国际生产率与绩效管理杂志》，第 53 卷，第 8 期，第 713–725 页，2004年1月，7 次引用（Crossref） [2025-05-05] 出版商：Emerald Group Publishing Limited。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 17410400410569125 19 1108. / . Y.-G. Nan、N. S. Yazd、I. Chapalo、K. Chah、X. Hu 和 P. Mégret，《采用析因设计研究CYTOP光纤中光纤布拉格光栅对温度、湿度和应变的响应特性》，《传感器》，第 22 卷，第 5 期，第 1934 页，2022年1月，2 次引用（Crossref） [2025-05-05] 期号：5 出版商：多学科数字出版研究所。 [ ] 1424 8220 22 5 1934 在线。可访问：https://www.mdpi.com/ - / / / . W.-C. Weng、F. Yang 和 A. Z. Elsherbeni，《利用田口方法进行线性天线阵列综合：电磁学领域的一种新型优化技术》，《IEEE天线与传播汇刊》，第 55 卷，第 3 期，第 723–730 页，2007年3月，154 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：https://ieeexplore.ieee.org/document/4120302 21. Mohammad Asif Zaman，《应用田口方法优化光纤拉曼放大器》，《光学工程》，第 55 卷，第 4 期，第 046103 页，2016年4月，4 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [在线]。可访问：https://doi.org/10 046103 22 1117 1 55 4 . / .OE. . . . A. S. Hedayat、N. J. A. Sloane 和 J. Stufken，《正交表与哈达玛矩阵》，载于《正交表》。美国纽约州纽约：Springer New York，1999年，第 145–166 页，丛书名称：Springer统计学丛书。 [在线]。可访问：http://link.springer.com/10 1007 978 1 4612 1478 6_7 . / - - - - . N. J. A. Sloane，《正交表库》。在线。可访问：http://neilsloane.com/oadir/ 24. P. J. Ross，《用于质量工程的田口技术：损失函数、正交试验、参数与公差设计》。McGraw-Hill Book Company，1988年。25. A. Hasegawa 和 Y. Kodama，《光纤中的导引中心孤子》，《光学快报》，第 15 卷，第 24 期，第 1443–1445 页，1990年12月，301 次引用（Crossref） [2025-05-05] 出版商：Optica出版集团。 [在线]。可访问：https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri = 15 24 1443 ol- - - . K. Blow 和 N. Doran，《平均孤子动力学与集总放大器孤子系统的运行》，《IEEE光子技术快报》，第 3 卷，第 4 期，第 369–371 页，1991年4月，145 次引用（Crossref） [2025-05-05]。 [ ] 82115 在线。可访问：https://ieeexplore.ieee.org/document/ . K. Tajima，《有损非线性光纤中的孤子展宽补偿》，《光学快报》，第 12 卷，第 1 期，第 54–56 页，1987年1月，183 次引用（Crossref） [2025-05-05]出版商：Optica出版集团。 [在线]。可访问：https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri = 12 1 54 ol- - - . Richardson D.J.、Chamberlin R.P.、Dong L. 和 Payne D.N.，《在38千米色散递减光纤中实现高质量孤子损耗补偿》，《电子学快报》，第 31 卷，第 19 期，第 1681–1682 页，1995年9月，33 次引用（Crossref） [2025-05-05] 出版商：英国工程技术学会。 [在线]。可访问：https://doi.org/10.1049/el:19951144

补充信息

图 S.1 和图 S.2 展示了正文论文第 3.1 节中导引中心孤子问题采用田口方法、遗传算法（GA）和粒子群优化（PSO）例程时的性能比较。此处展示的结果对应 $N_0 = 1.3285$，即 N_Theory。对于田口方法，RR 取值为 0.8，以促进探索而非利用。为确保方法之间的比较公平，遗传算法和粒子群优化例程的参数也选择为促进探索。下表列出了这两种例程所用的参数。其余仿真参数以及目标函数的定义均保持一致。

表 S.1 - 遗传算法和粒子群优化例程所选参数

遗传算法（GA）	**粒子群优化（PSO）**
个体数量 – 9	粒子群规模 – 9
最大迭代代数 – 100	最大迭代次数 – 100
选择函数 – 锦标赛	惯性权重范围 – [0.9 1.1]
交叉函数 – 0.2	自我调节权重 – 2.5
精英个体 – 1	社会调整权重 – 1.0
	最小邻居比例 – 0.25

在上述两种情况下，个体数量/粒子群规模均设为 9，以匹配田口方法的实验运行次数（或等价地说，因素组合数）。对于遗传算法，交叉函数设为 0.2，以促进探索。遗传算法会将 1 个精英个体原样保留至下一代，其基因不作任何改变；这一设置同样是为了与田口方法的更新步长相匹配。对于粒子群优化，自我调节权重设得高于社会调整权重，以促进探索。同样，粒子群中的各个粒子仅与邻域中的一小部分粒子互动，这也有助于探索。惯性权重范围的设置也有同样的作用，可确保粒子不会迅速减速，也不会受到个体或社会最优结果的影响。由于各方法中的实验运行次数/基因数/粒子群规模均保持一致，并且都采用自适应分步传播算法，因此各例程的执行时长相当接近，主要取决于自适应分步算法的执行时间。田口方法则不需要如此，因为它使用正交数组，具有确定性。

图 S.1 展示了遗传算法和粒子群优化程序与田口方法的收敛特性对比。图中定性地表明，田口方法和遗传算法的收敛速度明显快于粒子群优化。图 S.2 通过绘制目标函数 f_test 随迭代次数变化的数值，更定量地呈现了收敛情况。这表明，田口方法的收敛斜率比遗传算法更大。此外，遗传算法大约需要 50 次迭代才能达到最小值 f_test，而田口方法只需约 30 次迭代即可达到同样的结果。请注意，~20 额外的迭代次数对应于导引中心孤子问题中的 180 次分步传播，因此会带来计算开销。因此，在这一背景下，田口方法也有望显著提升速度。

尽管还需要进一步开展系统分析，以探索和比较不同优化技术的收敛特

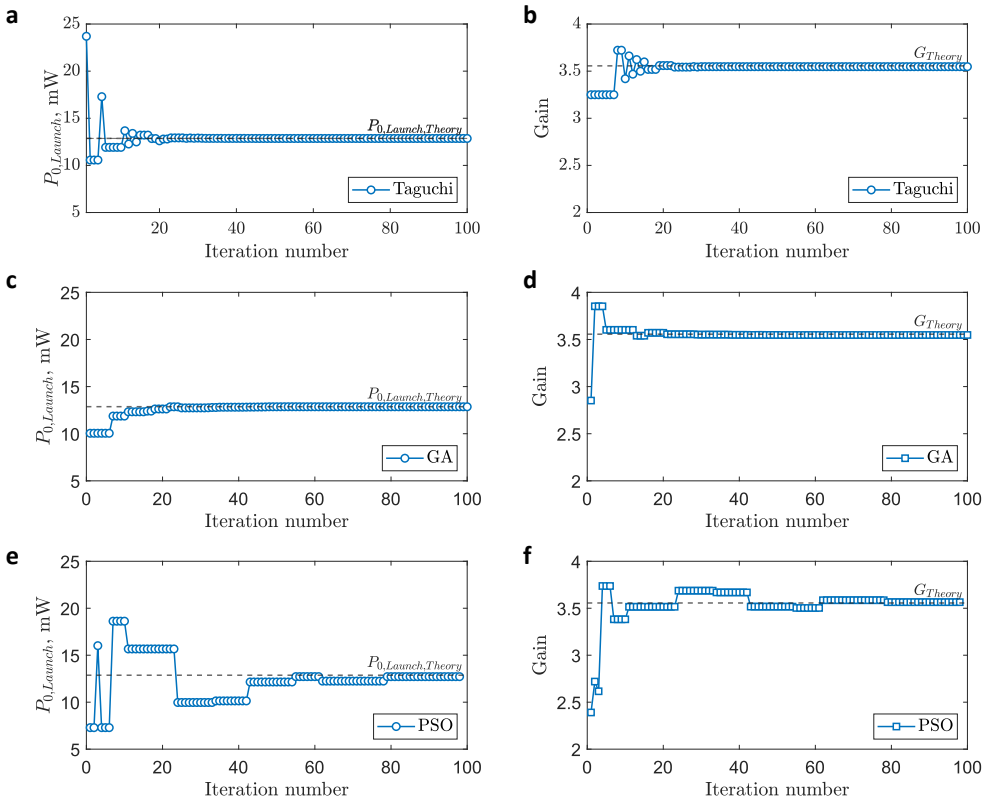


图 S.1田口方法、遗传算法和粒子群优化流程的比较。

性，但本文所呈现的结果表明，鉴于其实现和解释都很简单，田口方法可以非常有效地用于非线性脉冲传播问题。

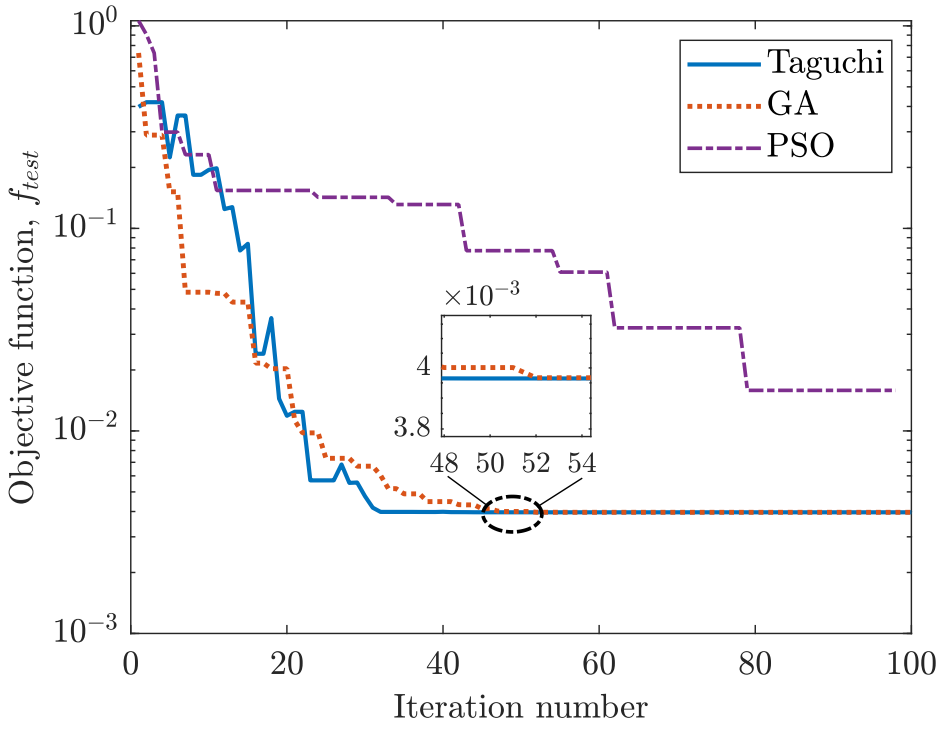


图 S.2 田口方法、遗传算法和粒子群优化算法的目标函数 f_test 收敛情况比较。