doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.042

基于改进 NSGA－Ⅱ算法的拖拉机传动系统匹配优化

傅生辉[1,2]　李　臻[1,2]　杜岳峰[1,2]　毛恩荣[1,2]　朱忠祥[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为实现拖拉机动力传动系统的最优化匹配,提高整机动力性和燃油经济性,提出一种基于改进非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm-Ⅱ,NSGA－Ⅱ)的拖拉机传动系统匹配优化方法。该方法引入正态分布交叉算子,在保证解集质量的基础上,扩大空间搜索范围,同时加入差分进化变异算子,抽取其中的差分向量与 NSGA－Ⅱ算法结合,从而避免算法陷入局部最优,改善种群分布性。随后,以变速箱各挡传动比为输入变量,以驱动功率损失率和比燃油消耗损失率均最低为优化目标,通过分析拖拉机设计理论车速、传动比公比、驱动附着力限制等约束条件,建立了变速箱传动比匹配优化模型,利用改进算法对拖拉机变速箱传动比进行优化,并与原 NSGA－Ⅱ算法及加权遗传算法进行对比。分析结果表明,改进 NSGA－Ⅱ算法求得的解集分布评价指标 SP 优于原 NSGA－Ⅱ算法,表明 Pareto 最优解分布更均匀,且更接近测试函数的真实 Pareto 前沿。经本文算法优化后,理论上拖拉机驱动功率损失率和比燃油消耗损失率分别降低了 41.62% 和 62.8%,运输挡头挡爬坡度可提高 2.35%,整机综合性能得到明显改善,且优化效果均优于对比算法,验证了本文方法的有效性,可为拖拉机传动系统设计与优化提供一定参考。

关键词: 拖拉机传动系统; 匹配优化; 驱动功率损失率; 比燃油消耗损失率; 改进非支配排序遗传算法
中图分类号: TH122; S219.032.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0349-09

Matching Optimization for Tractor Powertrain Based on Improved NSGA－Ⅱ Algorithm

FU Shenghui[1,2]　LI Zhen[1,2]　DU Yuefeng[1,2]　MAO Enrong[1,2]　ZHU Zhongxiang[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to optimize matching of the tractor powertrain and improve the power and fuel economy of the tractor, a new matching optimization method for tractor powertrain was put forward based on the improved non-dominated sorting genetic algorithm-Ⅱ. The normal distribution crossover operator (NDX) was introduced to expand the spatial search range on the premise of ensuring the quality of the non-dominated solution set. And meanwhile, the differential evolution mutation operator based differential evolutionary algorithm was used as directional guiding ideology to avoid falling into the local optimum and improve the uniformity of population distribution. Subsequently, by analyzing the design requirements and power-shift transmissions produced by New Holland, Case IH and John Deere, the optimization model of transmission ratios was established with constraints such as vehicle speed, ratio of gear ratios, driving adhesion restriction, and so on. In this model, gear ratios were taken as input variables, and the optimization objective was to get the lowest drive power loss rate and the lowest specific fuel consumption loss rate. The proposed algorithm was used to optimize the tractor powertrain and compared with the original NSGA－Ⅱ and the weighted genetic algorithm. The experimental results showed that the distributed index SP of the proposed algorithm was smaller than that of the original NSGA－Ⅱ, which meant that the improved NSGA－Ⅱ could obtain a more uniformly distributed and precise optimal solutions. And after optimization of the improved NSGA－Ⅱ, the drive power loss rate and the specific fuel consumption loss rate of the tractor could be theoretically reduced by 41.62% and 62.8%,

收稿日期: 2018－07－15　修回日期: 2018－08－17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)
作者简介: 傅生辉(1989—),男,博士生,主要从事农业装备智能化设计理论与方法研究,E-mail: fush89@cau.edu.cn
通信作者: 朱忠祥(1976—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业装备智能化设计及自动控制研究,E-mail: zhuzhonxiang@cau.edu.cn

respectively, and the climbing angle of the first transport gear could be increased by 2.35% than before, which was better than NSGA-Ⅱ and the weighted genetic algorithm. The overall performance of the tractor was improved obviously which verified the effectiveness of the improved NSGA-Ⅱ algorithm. To sum up, this method could provide a certain reference for the design and optimization of the tractor transmission.

Key words: tractor powertrain; matching optimization; drive power loss rate; specific fuel consumption loss rate; improved non-dominated sorting genetic algorithm-Ⅱ

0 引言

拖拉机动力传动系统的速比匹配直接决定整机作业性能,对其动力性和燃油经济性均有重要意义[1]。传统的拖拉机传动系统匹配设计多沿用汽车变速器设计方法,采用等比级数分配或依靠经验偏置等比级分配各挡传动比[2],不能兼顾动力性和燃油经济性,充分发挥拖拉机工作性能,具有一定的局限性。

目前,针对拖拉机传动系统速比匹配研究较少,多集中在汽车领域,主要以最高车速、加速时间、驱动功率损失率、典型循环工况百公里油耗、能量利用率等为目标进行优化[3-7]。其中,张抗抗等[8]建立了以最高车速、加速性能和百公里电耗为目标函数的优化模型,通过多目标遗传算法对电动汽车传动比进行了优化设计;程方晓[9]提出一种基于自适应保持多样性遗传算法的传动系传动比优化方法,实现了不同类型车辆的传动系参数优化;雷嗣军[10]利用 Matlab 和 Advisor 实现了基于多目标遗传算法的汽车传动系统联合优化仿真设计;ZHANG 等[11]根据爬坡能力和 NEDC 循环工况建立了汽车动力性和经济性优化模型,提出了基于模拟退火遗传算法的传动系匹配优化方法;王粉粉[12]综合考虑拖拉机不同挡位的实际作业需求,引入加权因子建立拖拉机动力性和经济性综合评价指标,利用遗传算法实现了拖拉机传动比的匹配优化。

多目标进化算法如今已成为求解复杂非线性 NP 问题的必要手段。常用的多目标进化算法主要有蚁群算法(Ant colony optimization, ACO)、强度帕累托进化算法(Strength pareto evolutionary algorithm, SPEA)、粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)、非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA)等[13-17]。其中,DEB 等[18]提出的 NSGA-Ⅱ算法以其 Pareto 支配的选择模式并辅以密度估算选择胜出机制而成为多目标进化算法的典范,广泛应用于电网系统规划[19-24]、管网优化设计[25-26]、机械手轨迹规划等领域[27-28],是迄今为止最优秀的多目标进化算法之一。但该算法通过计算聚集距离来保持种群分布性的机制存在一定缺陷,容易导致算法陷入局部最优[29]。

基于此,本文提出一种改进 NSGA-Ⅱ算法,用于求解拖拉机动力传动系统速比匹配优化问题,通过优化传动系传动比分配,以期有效处理整机动力性和燃油经济性需求间的突出矛盾,提高拖拉机整机综合性能。

1 拖拉机传动系统匹配优化模型

1.1 目标函数的建立

以拖拉机驱动功率损失率和比燃油消耗损失率作为整机动力性和燃油经济性评价指标,建立传动系统优化匹配目标函数。

(1)驱动功率损失率

对于 n 挡变速箱,j 挡下拖拉机驱动力为

$$F_{qj}=\frac{T_e i_j \eta_c}{r_q} \tag{1}$$

式中 F_{qj}——j 挡下拖拉机驱动力,kN

T_e——发动机转矩,N·m

i_j——j 挡的总传动比

η_c——总传动效率,%

r_q——驱动轮动力半径,m

拖拉机各挡理论速度为

$$v_j=\frac{0.377 n_e r_q}{i_j} \tag{2}$$

式中 v_j——j 挡下的理论车速,km/h

n_e——发动机转速,r/min

则 j 挡时驱动力曲线与横坐标所围面积为

$$A_j=\int_{v_j}^{v_{j+1}} F_{qj}(v)\,\mathrm{d}v \tag{3}$$

式中 v——拖拉机理论车速,km/h

理想驱动特性曲线所围成面积为

$$S_j=\int_{v_j}^{v_{j+1}} F_q(v)\,\mathrm{d}v=0.377\eta_c T_p n_p \ln\frac{v_{j+1}}{v_j} \tag{4}$$

式中 T_p——最大功率时的输出转矩,N·m

n_p——最大功率时发动机转速,r/min

F_q——理想特性下的驱动力,N

驱动功率损失率 η_{Fj} 定义为

$$\eta_{Fj}=\frac{S_j-A_j}{S_j}\times 100\% \tag{5}$$

驱动功率损失率反映了拖拉机传动系统特性与理想传动系统的差距，也反映了发动机动力性能的发挥程度，该值越小，说明发动机与传动系在动力性能方面匹配得越好。

(2)比燃油消耗损失率

拖拉机工况繁多，作业环境复杂，其燃油经济性无法仅用典型循环工况油耗或等速行驶百公里燃油消耗量等特定工况衡量。基于此，本文结合拖拉机牵引燃油消耗率和动力输出轴燃油消耗率定义，采用比燃油消耗损失率作为拖拉机燃油经济性评价指标，其值越小，说明拖拉机动力传动系统间的经济性匹配越有效。

$$\xi_{gj}=\frac{A_{gj}-S_{gj}}{S_{gj}}=\frac{\int_{v_j}^{v_{j+1}}g_{Tj}(v)\,\mathrm{d}v-\int_{v_j}^{v_{j+1}}g_{TL}(v)\,\mathrm{d}v}{\int_{v_j}^{v_{j+1}}g_{TL}(v)\,\mathrm{d}v}\times 100\% \tag{6}$$

式中　ξ_{gj}——j 挡时拖拉机比燃油消耗损失率

g_{TL}——具有理想驱动特性的拖拉机比油耗

A_{gj}——j 挡时拖拉机比油耗曲线所围面积

S_{gj}——j 挡时理想驱动特性下拖拉机比油耗曲线所围面积

g_{Tj}——j 挡时的拖拉机比油耗

综上，拖拉机传动系统优化目标函数为

$$\begin{cases}\min f_1(X)=\sum_{j=0}^{n}\eta_{Fj}(x_j)\\ \min f_2(X)=\sum_{j=0}^{n}\xi_{gj}(x_j)\end{cases} \tag{7}$$

式中　X——优化变量集合

$f_1(X)$——动力性评价目标函数

$f_2(X)$——经济性评价目标函数

1.2　传动比优化约束条件

拖拉机变速箱传动比分配需要满足设计理论车速、驱动力附着限制、最大牵引力、传动比公比等一系列约束条件。

(1)理论车速

若拖拉机Ⅰ挡在发动机额定转速 n_{ed} 下设计车速为 V_a，最低稳定转速 $n_{\min}$ 时设计起步车速为 V_d，设计最高车速为 V_c。而根据作业速度要求，基本作业挡中头挡理论车速 v_b 应大于 5 km/h，则拖拉机理论车速应满足

$$\begin{cases}v_1=\dfrac{0.377n_{ed}r_q}{i_1}\geqslant V_a\\ v_{1\min}=\dfrac{0.377n_{\min}r_q}{i_1}\leqslant V_d\end{cases} \tag{8}$$

$$v_b=\frac{0.377n_{ed}r_q}{i_b}\geqslant 5 \tag{9}$$

$$v_{\max}=\frac{0.377n_{ed}r_q}{i_n}\geqslant V_c \tag{10}$$

式中　$v_{1\min}$——Ⅰ挡理论起步车速，km/h

v_1——Ⅰ挡额定转速时理论车速，km/h

$v_{\max}$——最高理论车速，km/h

i_b、i_n——作业挡头挡和最高挡总传动比

(2)驱动力附着限制

受限于地面附着条件，最大驱动力应满足

$$F_{q\max}=\frac{T_e i_b\eta_c}{r_q}\leqslant\varphi Q_q \tag{11}$$

式中　$F_{q\max}$——最大驱动力，N

Q_q——驱动轮垂直载荷，N

φ——允许附着系数，约为 0.6～0.8

(3)最大牵引力

拖拉机最大牵引力按犁耕作业工况时基本作业的头挡计算，同时保留 10%～20% 的储备牵引力，以应对不同工况和农具引起的阻力变化。

$$\frac{T_e i_b\eta_c}{r_q}\geqslant 1.2zbhk+fG_ag \tag{12}$$

式中　z——犁耕犁铧数，取 5

b——单犁铧宽度，取 30 cm

h——耕深，取 25 cm

k——土壤比阻，取 8 N·cm^2

G_a——拖拉机质量，kg

f——滚动阻力系数，留茬地为例，取 0.06

(4)滚动阻力

在公路运输工况下，拖拉机达到最高车速时，驱动力应克服滚动阻力，即

$$F_q=\frac{T_{ed}i_n\eta_c}{r_q}\geqslant f'G_ag \tag{13}$$

式中　f'——公路滚动阻力系数，取 0.03

T_{ed}——拖拉机额定转矩，N·m

(5)相邻传动比公比

选取 John Deere、Case IH、New Holland 等品牌拖拉机装配的 10 款部分动力换挡变速箱，功率覆盖 100～164 kW，对其变速箱传动比分配进行分析，如图 1 所示。

由图 1 可知，不同品牌的拖拉机变速箱虽然挡位数、功率范围等性能指标存在差异，但传动比公比均遵循以下原则：①动力换挡主变速箱传动比接近等比级分配，公比约为 1.2～1.28。②区段换挡部分相邻挡位传动比公比在 1.18～2.39 之间，同一型号变速箱各区段均不相同，$q_{AB}>q_{CD}>q_{DE}>q_{BC}$。B、C 区段为基本作业速度范围，挡位分布比较集中，传动比公比较小，而 A 区段多为缓行挡和爬行挡，D、E 区段主要为运输挡，均不需要较多挡位，因此挡位分

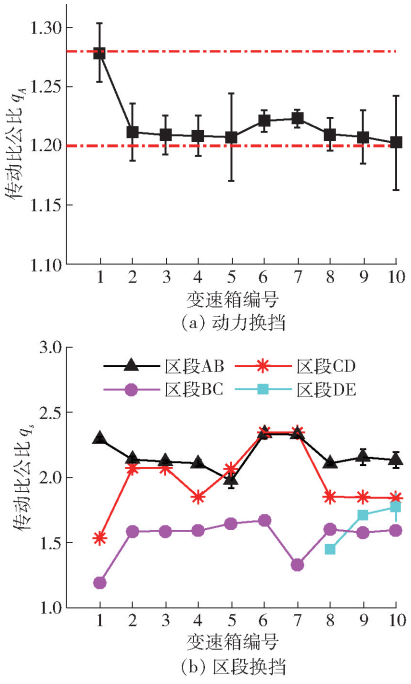

图 1 动力换挡变速箱传动比公比

Fig. 1 Gear ratio of power-shift transmission

布相对稀疏,传动比公比较大。

2 改进 NSGA－Ⅱ多目标优化算法

NSGA－Ⅱ算法核心思想如图 2 所示,针对其在非支配解的空间搜索能力和保持种群均匀性方面的不足,本文引入正态分布交叉算子(Normal distribution crossover,NDX)和差分变异算子来提高算法寻优能力。

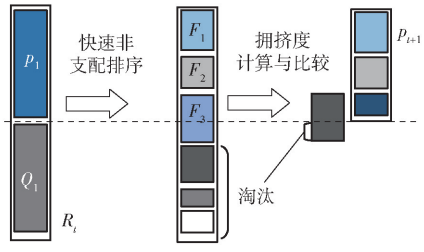

图 2 NSGA－Ⅱ算法核心思想

Fig. 2 Core of NSGA－Ⅱ algorithm

2.1 正态分布交叉算子

利用 NDX 算子替代模拟二进制交叉算子(Simulated binary crossover,SBX),在保证非支配解集质量基础上,进一步提升算法的全局搜索能力,更容易跳出局部最优。

假定父代 p_1、p_2,NDX 算子产生子代个体,对于第 i 个变量,其交叉过程为

$$\begin{cases} x_{1,i}=\dfrac{p_{1,i}+p_{2,i}}{2}+\dfrac{1.481(p_{1,i}-p_{2,i})\,|N(0,1)|}{2} \\ x_{2,i}=\dfrac{p_{1,i}+p_{2,i}}{2}-\dfrac{1.481(p_{1,i}-p_{2,i})\,|N(0,1)|}{2} \end{cases} \quad (u\leqslant 0.5) \tag{14}$$

$$\begin{cases} x_{1,i}=\dfrac{p_{1,i}+p_{2,i}}{2}-\dfrac{1.481(p_{1,i}-p_{2,i})\,|N(0,1)|}{2} \\ x_{2,i}=\dfrac{p_{1,i}+p_{2,i}}{2}+\dfrac{1.481(p_{1,i}-p_{2,i})\,|N(0,1)|}{2} \end{cases} \quad (u>0.5) \tag{15}$$

式中 u——区间(0,1)的随机数

$|N(0,1)|$——正态分布随机变量

为验证 NDX 算子的合理性,本文在一维搜索空间对 NDX 算子和 SBX 算子搜索能力进行比较。给定两个父代个体空间位置,对两种算子独立计算 6 000 次,即分别产生 12 000 个子代个体,统计各自在搜索空间的分布情况,如图 3 所示,其中,$p_1=0.7$,$p_2=0.2$,搜索概率均为 0.5。其搜索空间分布如图 3 所示,与 SBX 相比,NDX 算子搜索范围更广,更容易跳出局部最优解,且更容易获得完整 Pareto 解。

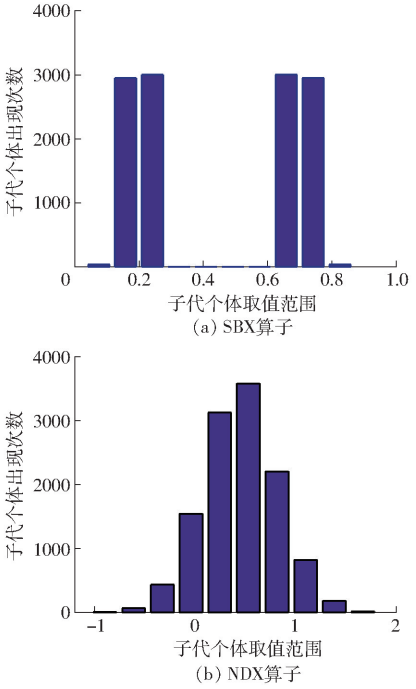

图 3 两种算子一维搜索空间分布

Fig. 3 Search space distribution of NDX and SBX

2.2 差分局部搜索策略

差分算法(Differential evolution,DE)本质上是一种具有保优思想的贪婪遗传算法,采用差分变异策略对个体进化方向进行干预扰动,具有局部寻优的优势。因此,本文采用 DE 算法中的差分向量作为变异算子,提高算法的局部搜索能力。

对于种群 p,同一层级中相邻的父代个体 $\{p_a$、$p_b\}\in p$,其临时子代个体 p_i',可利用变异算子计算

$$p_i'=rp_a+(1-r)p_b \tag{16}$$

式中 r 为相邻个体对变异方向的影响程度,区间为[0,1]。r 值越大,影响程度越大。

差分局部搜索策略首先需要找到当前代种群中非支配层级最高的个体集 $F(1)$，并通过计算距离阈值，选择需进行局部搜索的相邻个体，并利用式(16)产生新个体。其次，检查新个体与原始个体是否满足相互非支配关系，若满足，将新个体并入当前集合，形成新个体集，否则，丢弃新个体，然后计算新个体集的拥挤距离，根据拥挤距离保留新个体。其中，距离阈值和相邻个体选择具体如下：

(1) 距离阈值。找到当前种群非支配集合 $F(1)$ 在子目标 i 的两个极值端点，求解子目标 i 的目标值差，记为 D_i，根据

$$\delta_i = \frac{2D_i}{|F(1)| - 1} \tag{17}$$

式中　$|F(1)|$——当代种群中最高层级的非支配集个体数目

计算子目标 i 的距离阈值 δ_i。距离阈值 δ_i 在进化过程中将随 $|F(1)|$ 的规模变化而动态调整，从而保证当代 Pareto 前沿的均匀分布。

(2) 选择相邻个体。对非支配集按子目标 i 进行排序，将相邻个体的距离与子目标 i 的距离阈值 δ_i 进行比较。若大于或等于 δ_i，且相邻个体在其他子目标下的目标值至少有一对不相等，则相邻个体需要执行差分局部搜索。差分搜索在进化初期有助于种群分布的均匀性和广泛性，避免算法陷入局部最优。

2.3　改进 NSGA－Ⅱ算法流程

综上，改进 NSGA－Ⅱ算法求解流程如图 4 所示。

3　算法验证

为验证所提算法的有效性，采用 4 个不同的 MOP 测试函数 ZDT1、ZDT2、ZDT3 和 ZDT6 验证算法性能。此外，为评估 Pareto 解集的分布性，采用文献[29]提出的空间分布均匀性指标 SP 进行评价。SP 值越小，解集分布越均匀。

$$S_P = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\bar{d} - d_i)^2} \tag{18}$$

其中 $d_i = \min(|f_{1,j}(x) - f_{1,i}(x)| + |f_{2,j}(x) - f_{2,i}(x)|)$

式中　$\bar{d}$——所有 d_i 的平均值

d_i——当前解集中第 i 个解的目标值与其最近邻解目标值的距离

程序运行环境为 Matlab R2015a，算法设置参数为：初始种群 50，进化代数 500，交叉概率 0.9，变异概率 0.1。利用本文改进算法与原 NSGA－Ⅱ算法求解测试函数的 Pareto 解集，并与测试函数真实的 Pareto 前沿(500 个取样点)进行对比，结果见图 5。

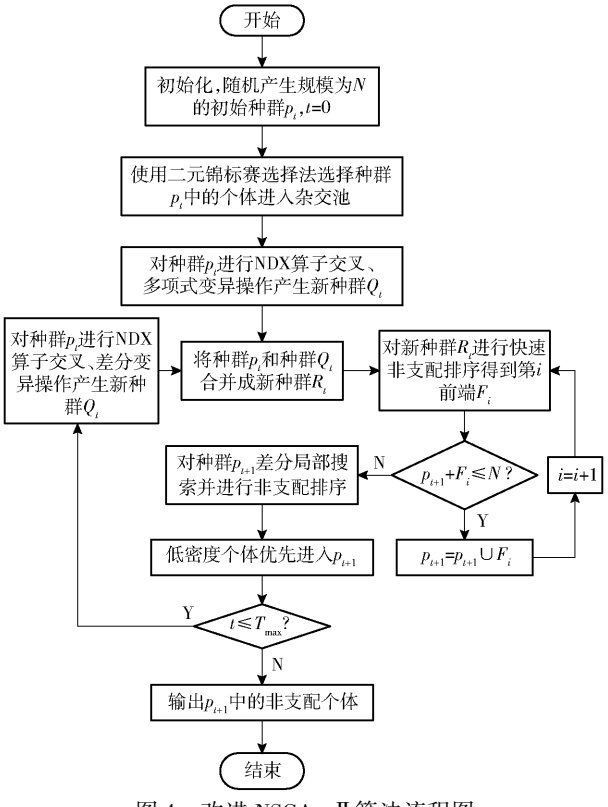

图 4　改进 NSGA－Ⅱ算法流程图

Fig. 4　Flow chart of improved NSGA－Ⅱ algorithm

从图 5 可知，改进 NSGA－Ⅱ算法与原 NSGA－Ⅱ算法均得到了较好的 Pareto 前沿，但与原算法相比，本文算法收敛性相对较好，求得的 Pareto 解更接近测试函数的真实 Pareto 最优解，而且原 NSGA－Ⅱ算法解集个体分布不均匀，在某些区域个体分布过于集中，而某些地方个体稀疏，甚至没有个体。运行 10 次统计得到 SP 均值及标准差。两种算法在不同测试函数上的分布性评价指标 SP 对比结果如表 1 所示，从表中可以看出，改进 NSGA－Ⅱ算法在解集分布均匀性和稳定性方面均优于原 NSGA－Ⅱ算法，进一步说明了本文算法的有效性。

4　传动比匹配优化分析

为验证本文算法的合理性和有效性，以表 2 所示的某型号拖拉机为例，利用本文算法对变速箱传动比进行优化。此外，与 NSGA－Ⅱ算法、文献[12]中的加权遗传算法等进行对比试验。

参照文献[30]，利用发动机台架试验数据建立发动机稳态输出转矩模型

$$\begin{aligned} T_e(\alpha, n_e) = {} & -618.7 + 1.37n_e + 7.421\alpha - 8.151\times10^{-4}n_e^2 + \\ & 0.004\,644n_e\alpha - 0.145\alpha^2 + 1.47\times10^{-7}n_e^3 - \\ & 1.642\times10^{-6}n_e^2\alpha + 2.047\times10^{-6}n_e\alpha^2 + 9.674\times10^{-3}\alpha^3 \end{aligned} \tag{19}$$

式中　α——油门开度

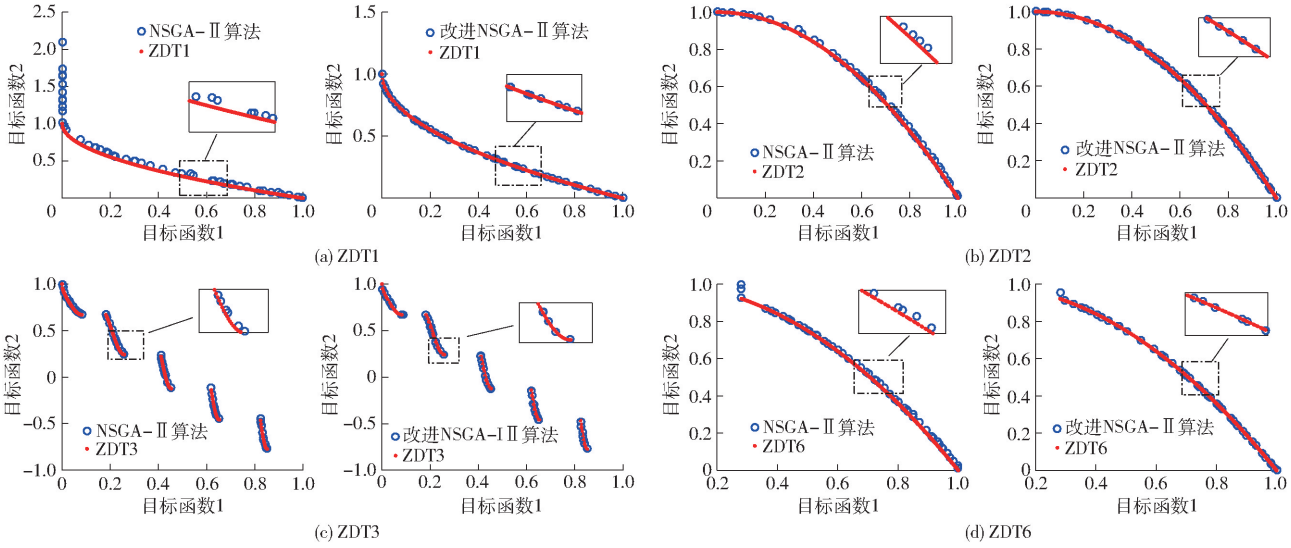

图 5 不同测试函数的 Pareto 前沿对比

Fig. 5 Comparison of Pareto fonts of test functions obtained by NSGA－Ⅱ and improved NSGA－Ⅱ

表 1 算法的分布性 SP 均值及其标准差比较

Tab. 1 Comparison of average value and standard deviation of SP

测试函数	改进 NSGA－Ⅱ算法		NSGA－Ⅱ算法	
	均值	标准差	均值	标准差
ZDT1	0.014 76	0.001 85	0.016 78	0.003 81
ZDT2	0.015 85	0.001 88	0.017 83	0.005 85
ZDT3	0.015 97	0.001 28	0.016 30	0.001 82
ZDT6	0.018 52	0.001 42	0.043 89	0.014 39

表 2 拖拉机整机及发动机基本参数

Tab. 2 Tractor and engine basic parameters

项目	指标	数值
发动机	型号	LR6105ZWT3
	标定功率/kW	132
	标定转速/(r·min^{-1})	2 200
	额定油耗/(g·(kW·h)$^{-1}$)	<235
传动系	中央传动比	4.55
	最终传动比	6.40
速度	挡位数	12(F)+4(R)
	前进速度/(km·h^{-1})	2.38～30.39
整机参数	额定牵引力/kN	40
	整机结构质量/kg	6 390
	使用质量/kg	6 783

同理,建立拖拉机燃油消耗率模型

$$g_e(T_e,n_e)=437.3-0.076\,6n_e-1.133T_e+5.963\times10^{-5}n_e^2-3.936\times10^{-5}n_eT_e+0.002\,192T_e^2-8.491\times10^{-9}n_e^3-2.695\times10^{-9}n_e^2T_e-4.537\times10^{-8}n_eT_e^2-1.238\times10^{-6}T_e^3 \tag{20}$$

4.1 基于改进 NSGA－Ⅱ算法的传动比优化

基于改进 NSGA－Ⅱ算法的拖拉机传动比优化参数设置如下:初始种群为 100,最大进化代数为 200,交叉概率 0.9,Pareto 前端个体系数为 0.3。根据非支配排序获取 Pareto 前沿,如图 6 所示,Pareto 最优解分布较为均匀,连续性强,反映出本文算法具有良好的空间搜索与收敛能力。

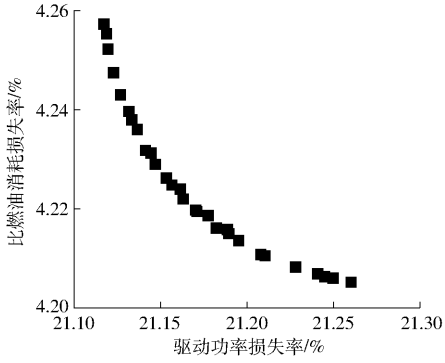

图 6 改进 NSGA－Ⅱ算法优化结果

Fig. 6 Optimization results of improved NSGA－Ⅱ

为选出最佳传动比,引入隶属度函数,通过隶属度反映对目标优化结果的满意程度。综合拖拉机动力性和经济性目标函数的隶属度选取变速箱传动比最优配置。首先利用

$$\phi_{i,k}(X)=\begin{cases}1 & (f_i=f_{i,\max})\\ \dfrac{f_{i,\max}-f_i}{f_{i,\max}-f_{i,\min}} & (f_{i,\min}<f_i<f_{i,\max})\\ 0 & (f_i=f_{i,\min})\end{cases} \tag{21}$$

式中 $\phi_{i,k}(X)$——目标函数 i 第 k 个解的隶属度

$f_{i,\max}$、$f_{i,\min}$——目标函数最大值、最小值

计算 Pareto 解中所有目标函数的隶属度,然后根据拖拉机设计偏好设置权重,通过

$$\phi_k(X)=\frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}}\lambda_i\phi_{i,k}(X)}{\sum_{k=1}^{N_p}\sum_{i=1}^{N_{obj}}\lambda_i\phi_{i,k}(X)} \tag{22}$$

式中 λ_i——隶属度权重

$\phi_k(X)$——第 k 个解的隶属度加权值

计算隶属度加权值，最大值对应的 Pareto 解为最优解。

4.2　优化结果对比分析

在算法对比试验中，NSGA－Ⅱ算法与本文算法的参数设置基本相同。加权遗传算法与文献[12]中的参数保持一致，交叉概率为 0.8，最大进化代数为 200，初始种群为 100。利用 3 种不同算法实现的拖拉机传动比匹配优化结果如表 3 所示。

表 3　基于 3 种算法的传动比优化结果对比

Tab. 3　Comparison of drive ratios optimized by three algorithms

挡位	优化前	NSGA－Ⅱ算法	文献[12]算法	本文算法
Ⅰ	10.91	9.26	8.70	9.08
Ⅱ	8.62	7.47	7.25	7.23
Ⅲ	6.81	6.12	6.04	6.02
Ⅳ	5.38	5.02	5.03	5.02
Ⅴ	4.25	4.00	3.93	4.03
Ⅵ	3.36	3.17	3.07	3.22
Ⅶ	2.65	2.48	2.40	2.59
Ⅷ	2.09	1.94	1.88	2.08
Ⅸ	1.65	1.52	1.47	1.68
Ⅹ	1.30	1.19	1.15	1.35
Ⅺ	1.00	0.96	0.89	1.00
Ⅻ	0.79	0.78	0.73	0.83

从表 3 中可知，与优化前相比，3 种算法优化后拖拉机传动比分配均有明显改变。Ⅰ～Ⅳ挡传动比降幅较大，基本作业挡与优化前基本保持一致，运输挡传动比优化结果差别明显。经本文算法优化后，除直接挡传动比保持不变外，其他运输挡传动比均略高于优化前传动比，排挡更稀疏，相应的速度变化范围更广。

为进一步分析各算法优化结果的差异，本文对比了采用不同算法得出的拖拉机理论车速，如图 7 所示。与优化前相比，优化后拖拉机各挡车速均有明显提高，速度分布更合理。其中，NSGA－Ⅱ算法与文献[12]算法优化结果基本一致，低速挡位车速明显提高，特别是Ⅰ挡理论车速分别提高 17.82% 和 25.11%，其他挡位作业速度提高了 1.28%～18.73%，最高车速分别达到了 32.13、34.33 km/h。经本文算法优化后，Ⅰ挡车速提高了 20.15%，最高挡车速降低至 30.20 km/h，基本作业挡车速提高了 0.48%～5.46%，Ⅳ挡车速达到 4.99 km/h，基本作业挡覆盖范围更广。此外，除直接挡外，运输挡各挡工作速度分别降低了 1.79%、3.70% 和 4.82%，变速箱排挡更集中，可满足不同的作业需求。

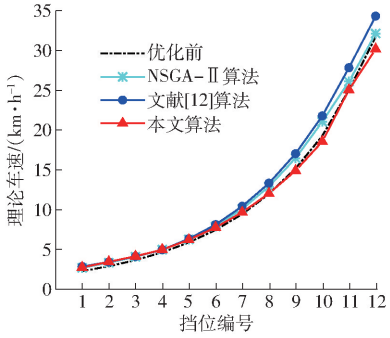

图 7　基于 3 种算法优化的拖拉机理论车速对比

Fig. 7　Comparison of theoretical speeds optimized by three algorithms

图 8 为不同算法的拖拉机动力性与燃油经济性优化结果对比。由图 8 可知，优化后各挡驱动力略有下降，驱动功率利用率和燃油经济性显著提高。在 5～20 km/h 主要作业速度区间挡位分布较为集中。其中，文献[12]算法侧重拖拉机动力性表现，因此，整机的动力性优化效果最优，驱动功率损失率为 20.19%，更接近理想驱动力曲线。然而比燃油消耗损失率为 8.62%，低于 NSGA－Ⅱ算法的 6.29% 和本文算法的 4.23%。NSGA－Ⅱ算法和本文算法均能兼顾拖拉机动力性和经济性表现。采用本文算法后，拖拉机的驱动功率损失率和比燃油消耗损失率分别比 NSGA－Ⅱ算法降低了 4.17% 和 32.75%，比优化前降低了 41.62% 和 62.80%，说明本文优化效果更佳。

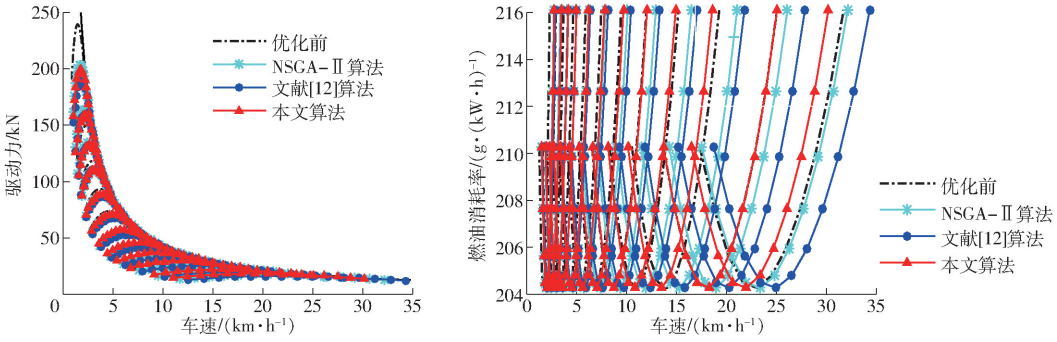

图 8　3 种算法优化的拖拉机动力性与经济性对比

Fig. 8　Comparison of tractor power and fuel economy optimized by three algorithms

表 4 为详细的优化前后拖拉机性能指标对比，从中可以看出，本文算法的优化效果更好，拖拉机车速范围更符合实际作业需求，速度分布更合理。此外，运输挡头挡爬坡度为 45.07%，高于其他算法的 39.57% 和 38.07%，较优化前提高了 2.35%，整机性能得到明显改善。

表 4 基于 3 种优化算法的拖拉机性能指标比较

Tab. 4 Performance comparison of tractor optimized by three algorithms

指标	优化前	NSGA－Ⅱ算法	文献[12]算法	本文算法
驱动功率损失率/%	36.21	22.06	20.19	21.14
比燃油消耗损失率/%	11.37	6.29	8.62	4.23
最高车速/(km·h^{-1})	31.73	32.13	34.33	30.20
Ⅰ挡车速/(km·h^{-1})	2.30	2.71	2.87	2.76
运输挡头挡爬坡度/%	44.03	39.57	38.07	45.07

5 结论

(1)提出了一种改进 NSGA－Ⅱ算法。该算法引入正态分布交叉算子和差分搜索策略，扩大了搜索范围，提高了算法的局部寻优能力，利用 4 组标准测试函数对改进算法进行了性能测试，证明了该算法的有效性。

(2)针对拖拉机传动比匹配优化问题，以拖拉机驱动功率损失率和比燃油消耗损失率作为动力性和燃油经济性评价指标，建立传动系统优化数学模型，基于改进 NSGA－Ⅱ算法求解得到了 Pareto 解集，然后利用隶属度加权计算得到最优传动比分配。多种算法优化结果对比表明，本文方法可实现驱动功率损失率和比燃油消耗损失率分别降低 41.62%、62.80%，运输挡头挡爬坡度提高 2.35%，挡位分布更加合理，能够适应更多复杂工况。进一步验证了本文算法求解多目标优化问题的有效性。

参 考 文 献

1 鞠超，王永强，董文华，等. 有级拖拉机传动系挡间传动比分配研究[J]. 拖拉机与农用运输车，2016，43(4)：28－34.
JU Chao，WANG Yongqiang，DONG Wenhua，et al. Research on adjacent transmission ratio distribution of tractor range transmission[J]. Tractor & Farm Transporter，2016，43(4)：28－34.（in Chinese）

2 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册[M]. 北京：机械工业出版社，1994.

3 宋强，叶山顶，李伟聪，等. 基于多目标遗传算法的纯电动汽车 AMT 综合换挡规律研究[J]. 汽车工程学报，2017，7(1)：44－51.
SONG Qiang，YE Shanding，LI Weicong，et al. Research on AMT overall shift schedule for pure electric vehicles based on NSGA－Ⅱ algorithm[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering，2017，7(1)：44－51.（in Chinese）

4 李军. 基于 Cruise 的某型大客车动力传动系统优化匹配研究[D]. 长春：吉林大学，2013.
LI Jun. Research on matching of powertrain for coach based on Cruise[D]. Changchun：Jilin University，2013.（in Chinese）

5 ZHOU X，QIN D，HU J，et al. Multi-objective optimization design and performance evaluation for plug-in hybrid electric vehicle powertrains[J]. Applied Energy，2017，208：1608－1625.

6 FOFANA A，HAAS O，ERSANILLI V，et al. Multi-objective genetic algorithm for an automatic transmission gear shift map[J]. IFAC-PapersOnLine，2016，49(3)：123－128.

7 张红. 重型汽车动力传动系参数匹配优化[D]. 淄博：山东理工大学，2012.
ZHANG Hong. Matching optimization of powertrain system parameters for heavy vehicle[D]. Zibo：Shandong University of Technology，2012.（in Chinese）

8 张抗抗，徐梁飞，华剑锋，等. 基于多目标优化的纯电动车动力系统参数匹配方法[J]. 汽车工程，2015，37(7)：757－765.
ZHANG Kangkang，XU Liangfei，HUA Jianfeng，et al. A parameter matching method for the powertrain of battery electric vehicle based on multi-objective optimization[J]. Automotive Engineering，2015，37(7)：757－765.（in Chinese）

9 程方晓. 基于自适应保持多样性遗传算法的汽车动力传动系多目标优化[D]. 长春：吉林大学，2011.
CHENG Fangxiao. Multi-objective optimization of automotive powertrain based on adaptive maintain diversity genetic algorithm[D]. Changchun：Jilin University，2011.（in Chinese）

10 雷嗣军. 汽车动力传动系参数匹配与仿真优化[D]. 杭州：浙江大学，2010.
LEI Sijun. Parameters matching and simulation optimization of automobile transmission[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2010.（in Chinese）

11 ZHANG P，CHEN Y，LIN M，et al. Optimum matching of electric vehicle powertrain[J]. Energy Procedia，2016，88：894－900.

12 王粉粉. 拖拉机电控机械式自动变速系统设计研究[D]. 洛阳：河南科技大学，2014.
WANG Fenfen. Study on the design for automated mechanical transmission system of tractor[D]. Luoyang：Henan University of Science and Technology，2014.（in Chinese）

13 叶素娣，徐敬华. 精密变位斜齿轮行星轮系混合型变量多目标优化设计[J]. 机械设计，2016，33(7)：98－104.
YE Sudi，XU Jinghua. Multi-objective optimization design of mixed variables on precision variable helical planetary gear train[J]. Journal of Machine Design，2016，33(7)：98－104.（in Chinese）

14 叶秉良，俞高红，赵匀. 拖拉机最终传动多目标模糊可靠性优化设计[J]. 农业机械学报，2010，41(4)：95－100.

YE Bingliang, YU Gaohong, ZHAO Yun. Multi-objective fuzzy reliability optimization design of tractor's final transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):95－100. (in Chinese)

15 ZHOU A, QU B Y, LI H, et al. Multi-objective evolutionary algorithms: a survey of the state of the art[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(1): 32－49.

16 TAN K C, LEE T H, KHOR E F. Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: performance assessments and comparisons[J]. Artificial Intelligence Review, 2002, 17(4):251－290.

17 ELBELTAGI E, HEGAZY T, GRIERSON D. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms[J]. Advanced Engineering Informatics, 2005, 19(1):43－53.

18 DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA－Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182－197.

19 MOSBAH M, ARIF S, MOHAMMEDI R D. Multi-objective optimization for optimal multi DG placement and sizes in distribution network based on NSGA－Ⅱ and fuzzy logic combination[C]// International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes, 2017:1－6.

20 王茜, 张粒子. 采用 NSGA－Ⅱ混合智能算法的风电场多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19):17－24.
WANG Qian, ZHANG Lizi. Multi-objective transmission planning associated with wind farms applying NSGA－Ⅱ hybrid intelligent algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 17－24. (in Chinese)

21 HU Y, BIE Z, DING T, et al. An NSGA－II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning [J]. Applied Energy, 2016, 167:280－293.

22 姜惠兰, 安星, 王亚微, 等. 基于改进 NSGA2 算法的考虑风机接入电能质量的多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21):5405－5411.
JIANG Huilan, AN Xing, WANG Yawei, et al. Improved NSGA2 algorithm based multi-objective planning of power grid with wind farm considering power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5405－5411. (in Chinese)

23 ABUL'WAFA A R. Optimization of economic/emission load dispatch for hybrid generating systems using controlled Elitist NSGA－Ⅱ[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 105(6):142－151.

24 盛万兴, 叶学顺, 刘科研, 等. 基于 NSGA－Ⅱ算法的分布式电源与微电网分组优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4655－4662.
SHENG Wanxing, YE Xueshun, LIU Keyan, et al. Optimal allocation between distributed generations and microgrid based on NSGA－Ⅱ algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4655－4662. (in Chinese)

25 乔俊飞, 魏静, 韩红桂. 基于改进 NSGA2 算法的给水管网多目标优化设计[J]. 控制工程, 2016, 23(12):1861－1866.
QIAO Junfei, WEI Jing, HAN Honggui. Multi-objective optimization of water distribution system based on an improved NSGA2 algorithm[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(12):1861－1866. (in Chinese)

26 王春林, 叶剑, 曾成, 等. 基于 NSGA－Ⅱ遗传算法高比转速混流泵多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 100－106.
WANG Chunlin, YE Jian, ZENG Cheng, et al. Multi-objective optimum design of high specific speed mixed-flow pump based on NSGA－Ⅱ genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 100－106. (in Chinese)

27 王会方, 朱世强, 吴文祥. 基于 INSGA－Ⅱ算法的机械手多目标轨迹规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 622－628.
WANG Huifang, ZHU Shiqiang, WU Wenxiang. INSGA－Ⅱ based multi-objective trajectory planning for manipulators[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(4):622－628. (in Chinese)

28 刘孟楠, 周志立, 徐立友, 等. 基于多性能目标的拖拉机运输机组优化设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):62－68.
LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Multi-objective optimization and design of tractor trailer systems[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 62－ 68. (in Chinese)

29 谢承旺, 李凯, 廖国勇. 一种带差分局部搜索的改进型 NSGA2 算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(10):235－237, 238.
XIE Chengwang, LI Kai, LIAO Guoyong. Improved NSGA2 algorithm with differential evolution local search[J]. Computer Science, 2013, 40(10):235－237, 238. (in Chinese)

30 席志强. 拖拉机动力换挡变速器控制系统研究[D]. 西安:西安理工大学, 2016.
XI Zhiqiang. Study on control system of tractor power-shift transmission[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. (in Chinese)