doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.004

拖拉机自动驾驶系统上线轨迹规划方法

贾　全　张小超　苑严伟　赵　博　伟利国　付　拓
（中国农业机械化科学研究院，北京 100083）

摘要：为解决现有拖拉机自动驾驶系统上线距离较长，且在上线目标点附近跟踪误差较大的问题，提出了一种基于量子遗传算法优化的 B 样条理论局部上线轨迹规划方法。综合考虑最大曲率约束、起止点航向约束和最大转向角约束，把最优轨迹规划问题转化为 B 样条控制点参数优化问题，采用量子遗传算法对目标函数进行寻优，从而求得距离最短的可行驶上线轨迹。设计了 4 种典型作业工况，仿真结果表明，对于不同作业工况，算法均可通过优化配置 B 样条控制点得到满足约束的上线轨迹，曲率和等效前轮转角变化平缓，有利于路径跟踪控制器进行曲线跟踪控制。田间试验结果表明，针对设计的复杂作业工况，单独采用纯追踪算法的上线距离为 78.6 m，基于上线轨迹规划方法的上线距离为 23.7 m，且后者在上线点附近的横向跟踪误差更小。

关键词：拖拉机；自动驾驶系统；量子遗传算法；B 样条理论；轨迹规划
中图分类号：S24；F323.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2018)04-0036-09

Guided Trajectory Planning Method for Tractor Autopilot System

JIA Quan　ZHANG Xiaochao　YUAN Yanwei　ZHAO Bo　WEI Liguo　FU Tuo
(*Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The existing tractor autopilot system relies on the built-in path tracking algorithm to approach a target point on the global path when the driver starts the navigation mode at any position in the field. The tracking path will produce a shock phenomenon near the target point, it will affect the path tracking accuracy, and the entire approach process is uncontrollable. In order to solve this problem, a guided trajectory planning method based on third-order B-spline theory was proposed. The trajectory with the minimum length was taken as the desired path, the maximum curvature constraint, the maximum steering angle constraint and the heading of starting goal point constraint were taken into account. Quantum genetic algorithm (QGA) was used to optimize the control points, and finally the B-spline theory was used to generate a smooth desired trajectory. Four kinds of operating conditions were tested in Matlab environment. The simulation results showed that the B-spline theory based on the QGA could be used to obtain a trajectory satisfying the multiple nonlinear constraints, and the trajectory curvature change was continuous, which was beneficial to the path tracking controller. A field test was carried out, and the results showed that the pure pursuit algorithm alone had a travel distance of 78.6 m, and the travel distance based on the guided trajectory planning method was 23.7 m. Compared with the existing autopilot system, the trajectory planning method based on B-spline theory was helpful to control the shape of tracking path and improve the controllability of approach process.

Key words: tractor; autopilot system; quantum genetic algorithm; B-spline theory; trajectory planning

0　引言

拖拉机自动驾驶系统是当前农业机械智能化领域不可或缺的一部分[1-3]，具备自主行驶能力的农业车辆不仅有助于提高劳动生产率，而且有利于解决农村劳动力不足的问题。

路径规划算法[4-5]是自动驾驶系统的关键技术，当前的研究热点大多集中在田间全局路径规

收稿日期：2017-09-29　修回日期：2017-11-06
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFD0700400、2017YFD0700403)和湖南省战略性新兴产业科技攻关类项目(S2016GXZLGG0101)
作者简介：贾全(1986—)，男，工程师，博士生，主要从事农业车辆自动驾驶技术研究，E-mail：jiaquan301@163.com
通信作者：张小超(1957—)，男，研究员，博士生导师，主要从事检测与控制技术研究，E-mail：zxc@caams.org.cn

划[6]以及地头转弯模式上，实现方法有几何法、人工势场法[7-8]、A*算法[9-10]、神经网络法[11]以及蚁群算法[12]等。关于上线轨迹规划的研究相对较少。因此，现有拖拉机自动驾驶系统只能依靠内置的路径跟踪算法[13-15]从车辆当前位置出发逼近全局路径上的目标上线点，整个上线过程行驶距离较长，且在目标点处会出现震荡，跟踪误差较大。拖拉机驾驶员为了提高上线精度，在上线过程中只能依靠手动驾驶，自动化程序较低。

为解决该问题，本文在现有研究基础上，综合考虑车辆运动学约束条件，对拖拉机从起始位置到全局路径目标点的自动上线轨迹开展相关研究。

1　上线轨迹描述

如图 1 所示，本文将全局路径上的起始作业位置定义为上线点；将拖拉机从其初始位置出发行驶至全局路径上线点的过程定义为上线过程，上线过程行驶过的距离称为上线距离；将上线过程中拖拉机经过的一系列离散位置点序列 $s=(S_{\text{start}},S_1,S_2,\cdots,S_n,S_{\text{goal}})$ 定义为上线轨迹。图 1 中，S_{goal} 是全局路径的起始作业点，也是上线轨迹的目标点。

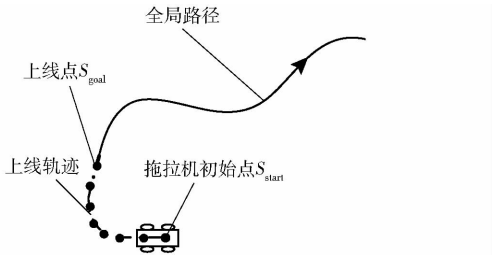

图 1　拖拉机上线轨迹示意图

Fig. 1　Schematic diagram of tractor guided trajectory

本文把上线轨迹规划问题定义为：在满足多种非线性约束条件的轨迹簇 s_i 中寻找一条距离最短的上线轨迹作为最优目标路径。函数描述为

$$s_{\text{optimal}}=\arg\min\sum_{s_i}d \tag{1}$$

式中　s_{optimal}——最优目标路径

d——第 i 条轨迹各点间距

$\sum_{s_i}d$——第 i 条轨迹长度

设上线路径 $s=S(x,y)$，(x,y) 是定义在高斯坐标系下的位置坐标。令 $x=f_x(u)$，$y=f_y(u)$，其中 u 为 B 样条曲线的节点[16]，则 x、y 对 u 的 1、2 阶导数为 $\dot{x}$、$\dot{y}$、$\ddot{x}$、$\ddot{y}$，由文献[16]可知，路径 s 各点处的航向角 θ、曲率 κ 和等效前轮转角 φ 的计算公式为

$$\theta=\arctan\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} \tag{2}$$

$$\kappa=\frac{\ddot{x}\dot{y}-\dot{x}\ddot{y}}{(\dot{x}^2+\dot{y}^2)^{3/2}} \tag{3}$$

$$\varphi=\arctan(L\kappa) \tag{4}$$

式中　L——拖拉机轴距

2　轨迹规划算法

2.1　上线轨迹约束

2.1.1　最大曲率约束

为保证上线轨迹具有可跟踪性，需要对轨迹曲率进行限制。曲率与拖拉机转弯半径的关系式为

$$\kappa=\frac{1}{R} \tag{5}$$

式中　R——转弯半径

图 2 所示为简化二轮车模型[17]，拖拉机最小转弯半径主要受轴距和转向前轮的最大转向角限制，其数值是固定的，计算公式为

$$R_{\min}=\frac{L}{\tan\varphi_{\max}} \tag{6}$$

式中　$R_{\min}$——最小转弯半径

$\varphi_{\max}$——前轮最大转向角

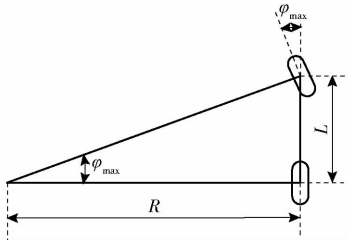

图 2　简化二轮车模型

Fig. 2　Simplified two-wheeled model

结合式(3)、(5)、(6)可知，上线轨迹各点处的曲率均须满足约束

$$\left|\frac{\ddot{x}\dot{y}-\dot{x}\ddot{y}}{(\dot{x}^2+\dot{y}^2)^{3/2}}\right|\leqslant\frac{\tan\varphi_{\max}}{L} \tag{7}$$

2.1.2　起止点航向约束

为避免拖拉机在上线轨迹的起始时刻出现原地转向或震荡现象，需要对上线路径的初始点航向进行约束。当路径点 $S_i=S_{\text{start}}$ 时，约束条件为

$$|\theta_s-\theta_v|\leqslant\varepsilon \tag{8}$$

式中　θ_s——路径航向　　θ_v——车身航向

ε——航向阈值(取较小的正数)

为了保证拖拉机上线轨迹与全局路径结合处的平滑度，提高上线点 S_{goal} 处的路径跟踪精度，当路径点 $S_i=S_{\text{goal}}$ 时，须满足约束

$$|\theta_s-\theta_g|\leqslant\varepsilon \tag{9}$$

式中　θ_g——目标点航向

2.1.3　转向角约束

拖拉机前轮转向范围决定了其路径跟踪的灵活性，如果上线轨迹某点处等效前轮转角过大，该点处的

路径将不具备可跟踪性。因此,需要对等效前轮转角进行约束。由式(3)、(4)可得到等效前轮转角,建立约束条件为

$$\left| \arctan \frac{L(\dddot{x}\dot{y} - \dddot{y}\dot{x})}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \right| \leqslant \varphi_{\max} \tag{10}$$

实际上线作业过程中,为保证路径跟踪精度,一般将拖拉机行驶速度控制在 3 km/h 以内。经测试,在该速度条件下只要规划的上线轨迹满足上述约束条件,拖拉机转向系统均可有效跟踪期望转角信号。因此,本文上线轨迹规划算法未考虑转向角速度及角加速度约束。

2.2 B 样条曲线

轨迹的表示方法有很多种,文献[18]提到了 7 种曲线表示方法,并对它们的优缺点进行了对比分析。曲线最终形状方便控制是 B 样条的优点之一,为了改变 B 样条曲线的形状,可以修改一个或多个控制参数,如控制点的位置、节点位置或曲线的次数。另外,B 样条曲线分段组成,修改某一控制点只引起与该控制点相邻的曲线形状发生变化,而远处的曲线形状不受影响。

B 样条函数本身的特性[19-21]使其非常适合应用于路径规划场合,因此本文选用 B 样条曲线进行上线轨迹规划。

2.2.1 B 样条曲线定义

B 样条曲线表达式为[14]

$$S_{i,n}(u) = \sum_{k=0}^{n} P_{i+k} F_{k,n}(u) \tag{11}$$

其中

$$F_{k,n}(u) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{n-k} ((-1)^j \mathrm{C}_{n+1}^{j} (u + n - k - j)^n) \tag{12}$$

式中 n——B 样条曲线阶次

$S_{i,n}(u)$——对应节点 u 的第 i 段曲线上的点

$F_{k,n}(u)$——n 次 B 样条基函数

P_{i+k}——第 $i+k$ 个控制点

其中,节点 $u \in [0,1]$;设控制点个数为 m,则 $i = 1,2,\cdots,m-n$,表示整条曲线由 $m-n$ 段 B 样条曲线平滑连接而成,每段曲线由 $n+1$ 个控制点生成。

由式(10)可知上线轨迹至少要保证 2 阶可导,为满足约束条件且降低计算量,本文选用 3 次 B 样条曲线,即 $n=3$。此时,B 样条基函数为

$$\boldsymbol{F}_{k,3}(u) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 \\ u^1 \\ u^2 \\ u^3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{G} \tag{13}$$

其中

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 u^1、u^2、u^3——节点 u 的 1、2、3 次幂

将式(13)代入式(11)可知,上线路径及其 1、2 阶导数分别为

$$(x,y) = \frac{1}{6}[u^3 \quad u^2 \quad u^1 \quad 1]\boldsymbol{G}\boldsymbol{P} \tag{14}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}u}, \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}u}\right) = \frac{1}{6}[u^2 \quad u^1 \quad 1 \quad 0]\boldsymbol{G}\boldsymbol{P} \tag{15}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}u^2}, \frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}u^2}\right) = \frac{1}{6}[u \quad 1 \quad 0 \quad 0]\boldsymbol{G}\boldsymbol{P} \tag{16}$$

其中 $\boldsymbol{P} = [P_i \quad P_{i+1} \quad P_{i+2} \quad P_{i+3}]^{\mathrm{T}}$

$(i = 1,2,\cdots,m-3)$

式中,$P_i \sim P_{i+3}$是用于计算第 i 段 B 样条方程的 4 个控制点。

2.2.2 样条曲线控制点确定

当样条曲线的控制点较少时不易求得满足约束的期望路径,控制点过多则会造成方程求解困难,增加运算时间。根据经验采用 6 个控制点 $P_0 \sim P_5$ 生成满足约束条件的三阶 B 样条上线轨迹。

现有文献大多采用优化算法直接求取 N 个控制点[16,22],对于 6 个控制点 $P(x,y)$ 需要优化的参数为 12 个,当使用迭代方法求解时运算量非常大。为了提高轨迹规划速度,有必要研究曲线约束与控制点间的关系以简化计算。

对于三阶 B 样条曲线,当 3 个相邻的控制点在同一条直线上且间距相等时,生成的 B 样条曲线与直线相切于中间的控制点,如图 3 所示。

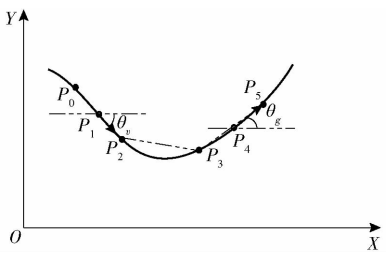

图 3 B 样条曲线控制点关系

Fig. 3 B-spline control points relationship

依据上线路径初始点的航向角约束,选择控制点 P_0、P_1、P_2。当 3 个控制点满足如下条件,即可满足拖拉机初始状态约束:选定拖拉机初始位置为 P_1;P_0、P_1、P_2 三点共线;矢量 P_0P_2 的方向角与拖拉机初始航向一致;P_0 和 P_2 关于 P_1 对称。

同理,依据目标点航向约束,确定控制点 P_3、P_4、P_5,并选定 P_4 为目标点位置坐标。

设线段 P_0P_1 和 P_1P_2 的长度为 l_1，线段 P_3P_4 和 P_4P_5 的长度为 l_2。依据起止点航向约束选定控制点 P_1 和 P_4 后，只要确定 l_1 和 l_2 的数值即可求得其它控制点并生成上线轨迹，从而把最优轨迹规划问题转变为求 l_1 和 l_2 的最优解问题，相比求解 12 个参数，该方法只需要优化 2 个参数，有效减少了算法的运算量。

2.3　基于量子遗传算法的参数优化

本文采用量子遗传算法求解 l_1 和 l_2，量子遗传算法[22]（Quantum genetic algorithm，QGA）是遗传算法和量子计算结合产生的一种新的概率进化算法，比传统遗传算法具有更快的收敛速度和并行处理能力。

将 l_1、l_2 作为个体进行寻优，把上线轨迹的距离取负值作为适应度函数（轨迹越短，适应度值越大），按照以下算法流程循环执行直至达到结束条件：

（1）初始化种群 $Q(t_0)$。

（2）对初始化种群 $Q(t_0)$ 中的每个个体（即 l_1 和 l_2）进行一次测量，得到对应的确定解（上线轨迹距离）。

（3）对各个确定解进行适应度（轨迹距离取负值）评估。

（4）记录最优个体和对应的适应度，以最优个体作为下一代进化目标。

（5）判断是否满足结束条件，是则退出，否则继续计算。

（6）对种群 $Q(t)$ 中的每个个体实施一次测量，得到对应的确定解。

（7）对各个确定解进行适应度评估。

（8）量子旋转门更新种群，得到下一代种群 $Q(t+1)$。

（9）记录最优个体和对应的适应度。

（10）将迭代次数加 1，返回步骤（5）。

3　仿真分析

3.1　仿真实例设计

设拖拉机模型采用前轮转向，轴距为 2.2 m，前轮转角范围为 $[-\pi/6,\pi/6]$，单位为 rad。由 2.1 节所述方法建立上线轨迹约束模型。

将拖拉机初始位置 P_{start} 定义为（0，0），初始航向角 θ_{start} 定义为 0 rad。图 4 中 P_{goal} 是目标点位置，θ_{goal} 是目标点航向角，r 是拖拉机初始位置和目标点的相对距离，θ_r 是矢量 $P_{start}P_{goal}$ 的方向角。

为了使仿真实例更具代表性，设计 4 种作业工况。取 θ_r 初值为 $\pi/4$，按照 $\pi/2$ 等间隔分布；令 θ_{goal} 与 θ_{start} 的方向角分别相差 0、$\pi/4$、$3\pi/4$、π，各工况目标点位置分布和航向如图 4 所示，具体参数见表 1。初始工况 1～4 分别代表以下 4 类作业工况：

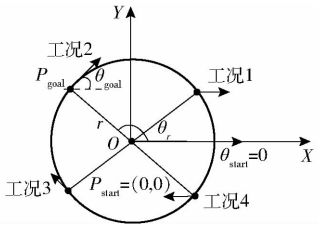

图 4　工况初始状态示意图

Fig. 4　Schematic diagram of initial state of conditions

初始工况 1：$|\theta_r-\theta_{start}|\in[0,\pi/2]$，$|\theta_{goal}-\theta_{start}|\in[0,\pi/2)$；初始工况 2：$|\theta_r-\theta_{start}|\in(\pi/2,\pi]$，$|\theta_{goal}-\theta_{start}|\in[0,\pi/2)$；初始工况 3：$|\theta_r-\theta_{start}|\in(\pi/2,\pi]$，$|\theta_{goal}-\theta_{start}|\in[\pi/2,\pi]$；初始工况 4：$|\theta_r-\theta_{start}|\in[0,\pi/2]$，$|\theta_{goal}-\theta_{start}|\in[\pi/2,\pi]$。

表 1　4 种初始作业工况参数

Tab. 1　Four initial operating conditions parameters

初始工况	θ_r	θ_{goal}
1	$\pi/4$	0
2	$3\pi/4$	$\pi/4$
3	$-3\pi/4$	$3\pi/4$
4	$-\pi/4$	π

结合初始状态描述和 2.2.2 节内容得各控制点计算方法如表 2 所示，其中相对距离 r 取 20 m，l_1 和 l_2 采用 2.3 节所述量子遗传算法求解，为了尽可能找到全局解，取种群规模为 60，优化代数为 200。

表 2　控制点计算方法

Tab. 2　Control points calculation method

控制点	x	y
P_0	$-l_1$	0
P_1	0	0
P_2	l_1	0
P_3	$r\cos\theta_r-l_2\cos\theta_{goal}$	$r\sin\theta_r-l_2\sin\theta_{goal}$
P_4	$r\cos\theta_r$	$r\sin\theta_r$
P_5	$r\cos\theta_r+l_2\cos\theta_{goal}$	$r\sin\theta_r+l_2\sin\theta_{goal}$

3.2　仿真结果分析

按照仿真实例描述在 Matlab 软件环境中编程实现各工况条件下上线轨迹规划，采用量子遗传算法优化得到各工况控制点分布如表 3 所示，上线轨迹仿真结果如图 5～9 所示。

（1）量子遗传算法优化过程见图 5。从图 5 可知，4 种工况条件下目标函数均可在 40 代左右迭代收敛到最佳值。l_1、l_2 最优解及相应上线轨迹长度如表 4 所示，对比各初始状态及上线轨迹长度可知，在相对距离 r 相同情况下 4 类作业工况所需最小上线

表 3 4 种作业工况轨迹控制点

Tab. 3 Trajectory control points for four operating conditions m

控制点	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
P_0	(-2.34,0)	(-1.90,0)	(-3.12,0)	(-2.16,0)
P_1	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
P_2	(2.34,0)	(1.90,0)	(3.12,0)	(2.16,0)
P_3	(11.40,14.14)	(-17.30,10.97)	(-9.79,-18.48)	(16.30,-14.14)
P_4	(14.14,14.14)	(-14.14,14.14)	(-14.14,-14.14)	(14.14,-14.14)
P_5	(16.87,14.14)	(-10.97,17.30)	(-18.48,-9.79)	(11.97,-14.14)

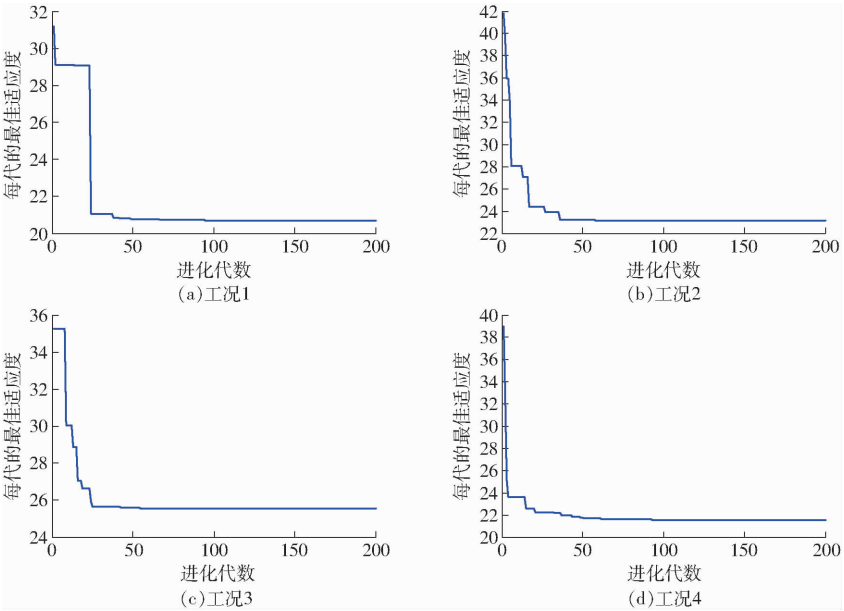

图 5 量子遗传算法优化过程

Fig. 5 Quantum genetic algorithm optimization process

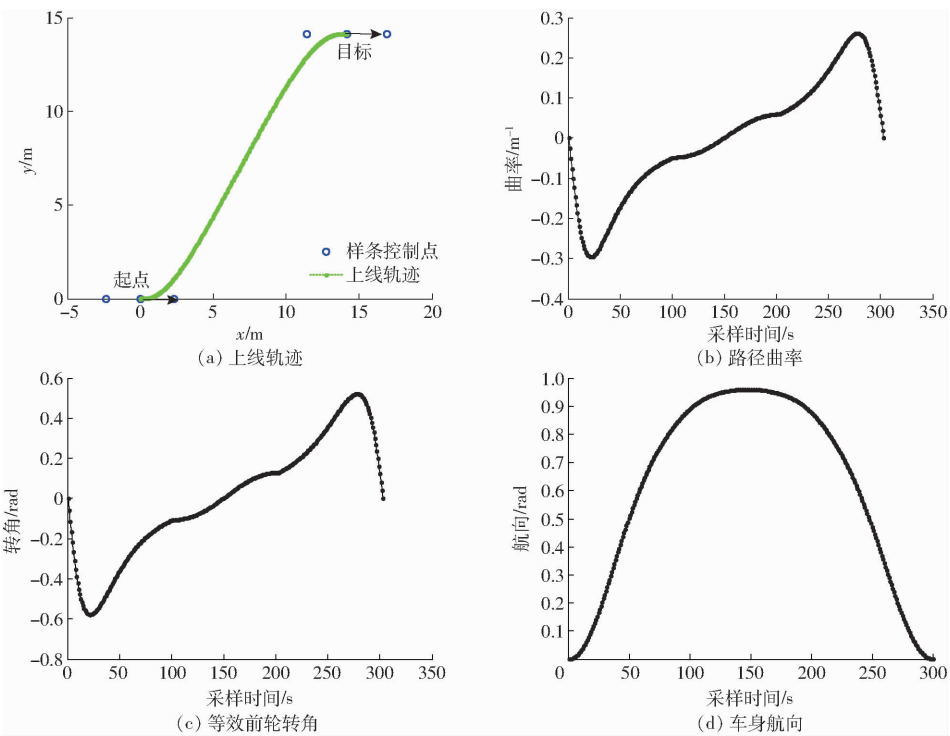

图 6 工况 1 上线轨迹规划结果

Fig. 6 Guided trajectory planning results of case 1

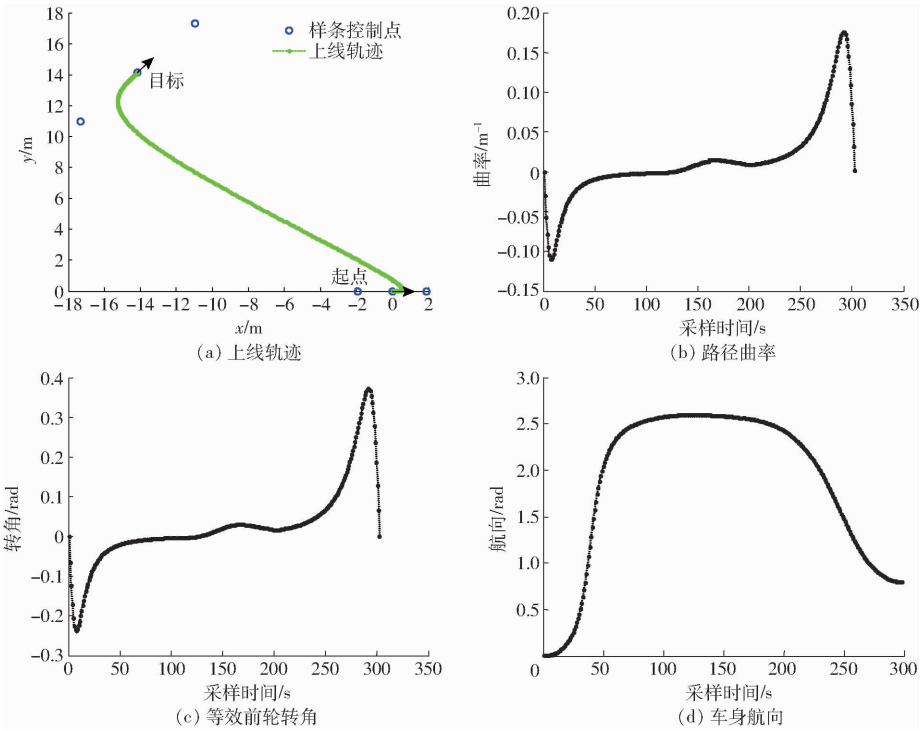

图 7　工况 2 上线轨迹规划结果

Fig. 7　Guided trajectory planning results of case 2

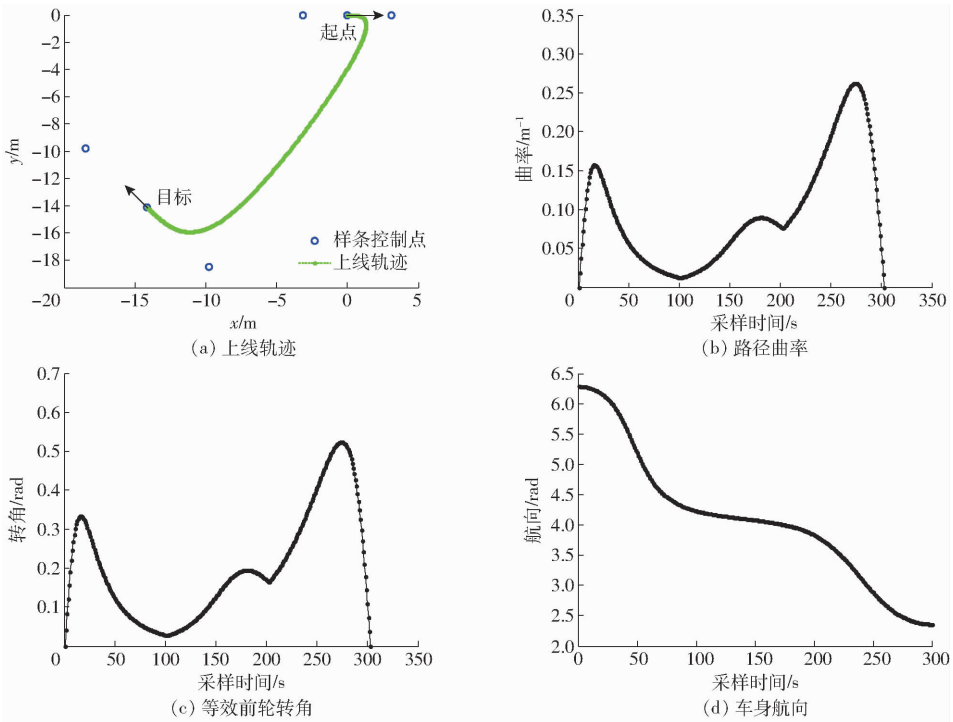

图 8　工况 3 上线轨迹规划结果

Fig. 8　Guided trajectory planning results of case 3

距离由小到大排序为工况 1、工况 4、工况 2、工况 3。

(2)各工况上线轨迹规划结果如图 6 ~ 9 所示。由图 6 ~ 9 中的图 a 和表 4 可知,4 种工况条件下,均可通过优化配置 B 样条控制点实现上线轨迹规划;由图 6 ~ 9 中的图 b 可知,上线轨迹各点处曲率连续且均不大于 0.26 m^{-1},上线初始点和目标点处曲率接近零,有利于提高起止点路径跟踪效果。

(3)由图 6 ~ 9 中的图 c 可知,拖拉机沿上线轨迹行驶时,最大等效前轮转角均小于 0.52 rad;等效前轮转角在初始时刻接近于零,有利于避免车辆原地转向情况;转角变化较为平缓,有利于实现控制器对期望角度的跟踪。

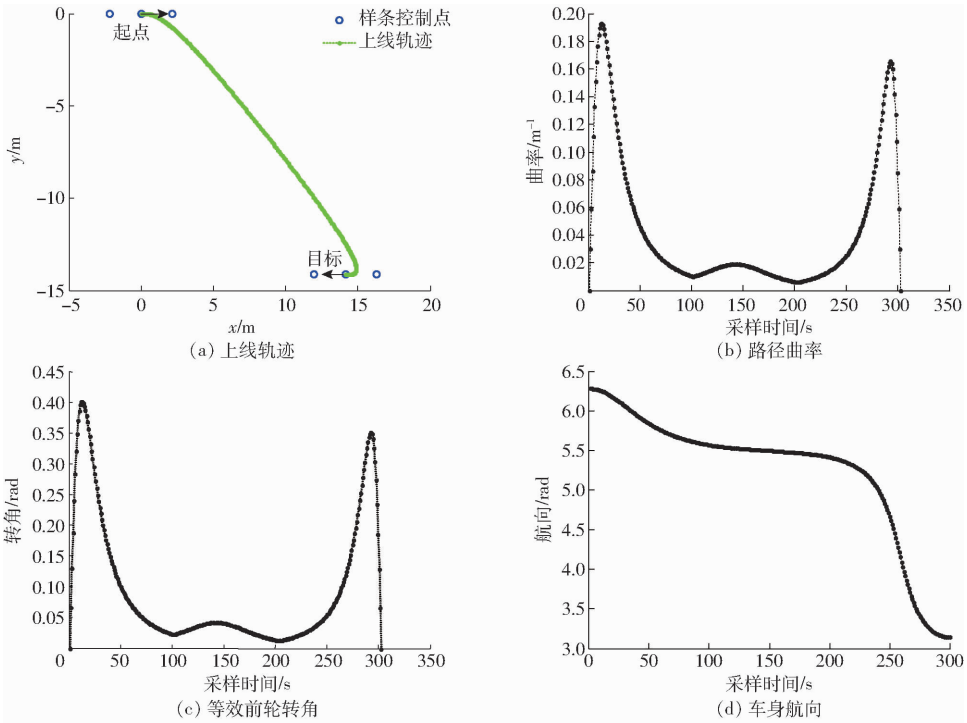

图 9 工况 4 上线轨迹规划结果

Fig. 9 Guided trajectory planning results of case 4

表 4 l_1、l_2最优解及上线轨迹长度

Tab. 4 Optimal solution and guidance trajectory length

m

工况序号	l_1	l_2	轨迹长度
1	2.34	2.73	20.69
2	1.90	4.47	23.11
3	3.13	6.14	25.56
4	2.17	2.16	21.58

(4)由图 6~9 中的图 d 可知,车身航向在上线过程中平滑过渡,轨迹在起始点处的航向均在零附近,与起始点的真实航向接近;目标点处的航向与仿真实例中设计的目标点航向 0、π/4、3π/4、π 接近,满足起止点航向约束条件。

4 田间试验

4.1 试验设计

田间试验在中国农业机械化科学研究院北京农机试验站进行。选用雷沃 M1004 型拖拉机作为试验车辆,选用自主研发的 BDLeader-301 型农业机械导航系统作为控制平台,试验现场及平台硬件组成如图 10 所示。

由仿真结果可知,在第 3 类工况条件下上线距离较长,曲率和航向变化较大,路径跟踪相比其它几类工况较为复杂。因此,设计了圆形全局路径,并针对第 3 类工况条件下的上线轨迹规划方法开展田间对比试验研究,如图 11 所示。分别基于纯追踪算法[23]和上线轨迹规划方法完成上线过程,拖拉机上

图 10 装配 BDLeader-301 型导航系统的 M1004 型拖拉机

Fig. 10 M1004 tractor equipped with BDLeader-301 autopilot system

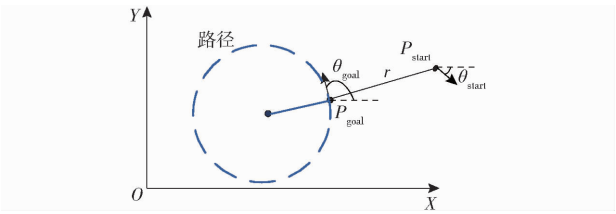

图 11 田间试验设计

Fig. 11 Field trial design

线行驶速度为 3 km/h。

试验流程如图 12 所示。由于试验田块限制,把圆形路径的半径设为 10 m,拖拉机初始位置到目标点的距离 r 设为 6.5 m,以拖拉机到达全局路径终点作为终止条件。

4.2 试验结果分析

田间试验上线轨迹对比如图 13 所示。从图 13 可知,上线过程中基于上线轨迹规划方法的跟踪距离相对较短,实际计算结果为 23.7 m;单独采用纯

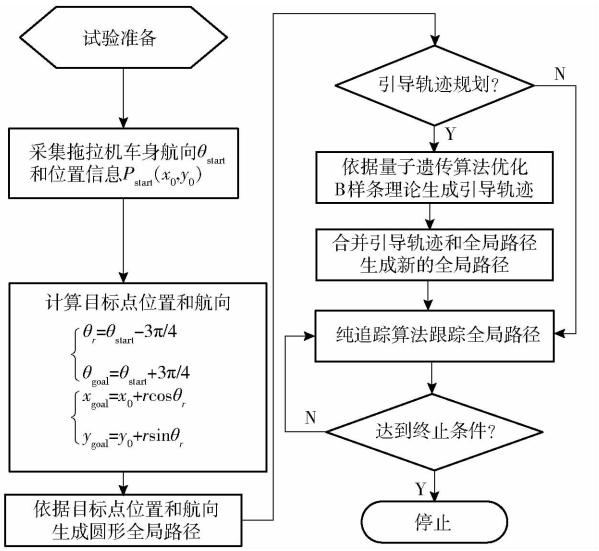

图 12　田间试验流程

Fig. 12　Flow chart of field test

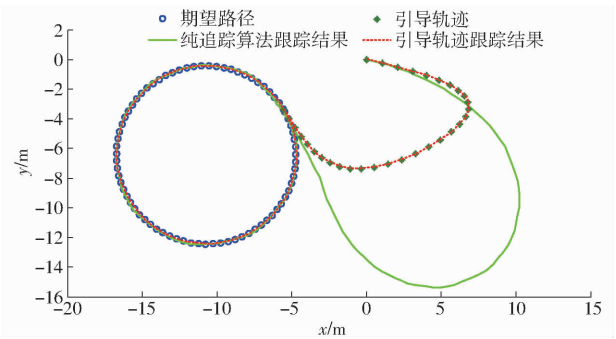

图 13　田间试验对比

Fig. 13　Comparison results of field test

追踪算法跟踪效果较差，实测跟踪轨迹长度为 78.6 m。

图 14 和图 15 对比给出了前轮转角的变化曲线。图中横轴表示拖拉机导航系统在自动跟踪上线轨迹和全局路径过程中，上位机软件对拖拉机前轮角度的离散采样点，纵轴表示拖拉机前轮转角。由图 14 可知，单独采用纯追踪算法时，拖拉机前轮转角在目标上线点附近出现了较大幅度的摆动，这会导致车身震荡，影响该位置的路径跟踪精度和乘坐舒适性；当增加上线轨迹规划方法后，前轮转角在上线过程中变化连续，可以平稳地过渡到跟踪全局路径所期望的前轮转角，如图 15 所示。

图 16 对比了 2 种上线跟踪方法在全局路径上的横向跟踪误差，误差定义见文献[23]。图中横坐标表示拖拉机导航系统从全局路径起始位置自动跟踪至全局路径终止位置过程中，上位机软件对横向跟踪偏差的采样时间，纵坐标表示横向跟踪误差。从图 16 可知，单独采用纯追踪算法在全局路径初始阶段的跟踪误差较大，基于上线轨迹方法在全局路径上的跟踪结果相对平稳。

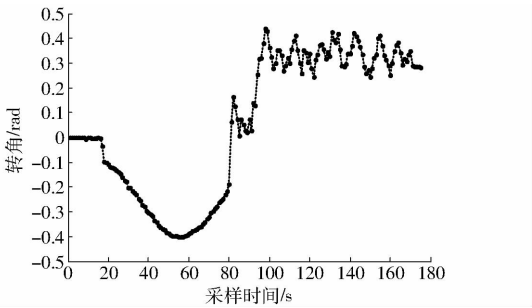

图 14　纯追踪算法前轮转角变化曲线

Fig. 14　Changing curve of front wheel angle by pure pursuit algorithm

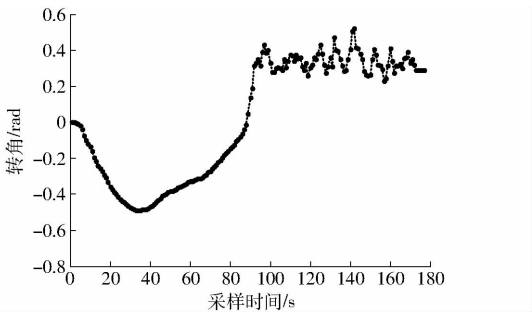

图 15　上线轨迹规划算法前轮转角变化曲线

Fig. 15　Changing curve of front wheel angle by guided trajectory planning algorithm

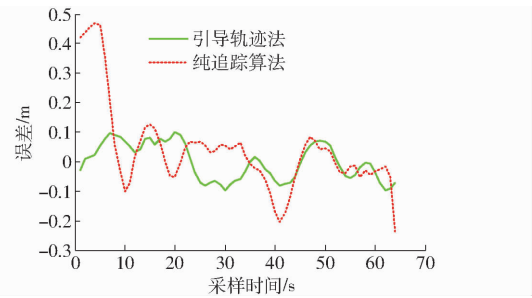

图 16　跟踪误差对比

Fig. 16　Comparison result of tracking errors

5　结论

(1)针对现有拖拉机自动导航系统在上线过程中的不足，提出了一种基于量子遗传算法优化的 B 样条理论上线轨迹规划方法。综合考虑最大曲率约束、起止点航向约束和最大转向角约束，把最优轨迹规划问题转换为 B 样条控制点参数优化问题，将上线距离作为优化目标，利用量子遗传算法建立了期望轨迹函数。

(2)根据拖拉机上线作业初始状态的不同，设计了 4 种典型作业工况验证上线轨迹规划算法。仿真结果表明：基于量子遗传算法优化的 B 样条理论可以求得满足多个非线性约束条件的期望轨迹，轨迹曲率变化连续，有利于路径跟踪控制器进行曲线跟踪控制。

(3)针对第 3 类作业工况，开展了田间对比试

验,试验结果表明:相比当前拖拉机自动驾驶系统上线模式,基于量子遗传算法优化的 B 样条理论上线轨迹规划方法有助于减小上线距离,提高了全局路径的导航控制精度。

参 考 文 献

1 ENGLISH A, ROSS P, BALL D, et al. Vision based guidance for robot navigation in agriculture[C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation(ICRA), 2014:1693 - 1698.

2 罗锡文,张智刚,赵作喜,等. 东方红 X - 804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009, 25(11):139 - 145.
LUO X W, ZHANG Z G, ZHAO Z X, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X - 804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139 - 145. (in Chinese)

3 伟利国,张权,颜华,等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报,2011,42(7):186 - 190.
WEI Liguo, ZHANG Quan, YAN Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(7): 186 - 190. (in Chinese)

4 GALCERAN E, CARRERAS M. A survey on coverage path planning for robotics[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1258 - 1276.

5 HAMEED I A. Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(3 - 4): 965 - 983.

6 刘刚,李笑,康熙,等. 基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):21 - 29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s004&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.004.
LIU Gang, LI Xiao, KANG Xi, et al. Automatic navigation path planning method for land leveling based on GNSS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):21 - 29. (in Chinese)

7 师五喜, 李福荣, 常绍平, 等. 基于递阶模糊系统的人工势场法机器人路径规划[J]. 天津工业大学学报, 2014, 33(6): 45 - 50.
SHI W X, LI F R, CHANG S P, et al. Robot path planning of artificial potential field method based on hierarchical fuzzy system [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2014, 33(6): 45 - 50. (in Chinese)

8 LI G, TAMURA Y, YAMASHITA A, et al. Effective improved artificial potential field-based regression search method for autonomous mobile robot path planning[J]. International Journal of Mechatronics and Automation, 2013, 3(3): 141 - 170.

9 彭松,贾阳. 月球车全局路径规划中的 A* 算法改进[J]. 航天器工程, 2010(4): 80 - 85.

10 黄辰, 费继友, 刘洋, 等. 基于动态反馈 A* 蚁群算法的平滑路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):34 - 40, 102. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170404&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.004.
HUANG Chen, FEI Jiyou, LIU Yang, et al. Smooth path planning method based on dynamic feedback A* ant colony algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):34 - 40, 102. (in Chinese)

11 NOGUCHI N, TERAO H. Path planning of an agricultural mobile robot by neural network and genetic algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1997, 18(2 - 3): 187 - 204.

12 ZHOU K, JENSEN A L, SØRENSEN C G, et al. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 12 - 22.

13 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1 - 10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1 - 10. (in Chinese)

14 孟庆宽,仇瑞承,张漫,等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):29 - 36,58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150305&journal_ id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.005.
MENG Qingkuan, QIU Ruicheng, ZHANG Man, et al. Navigation system of agricultural vehicle based on fuzzy logic controller with improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 29 - 36,58. (in Chinese)

15 白晓平,胡静涛,高雷,等. 农机导航自校正模型控制方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(2):1 - 7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150201&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.001.
BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 1 - 7. (in Chinese)

16 李红, 王文军, 李克强. 基于 B 样条理论的平行泊车路径规划[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 143 - 151.

17 SNIDER J M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2009.

18 GALLINA P, GASPARETTO A. A technique to analytically formulate and to solve the 2-dimensional constrained trajectory planning problem for a mobile robot[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2000, 27(3): 237 - 262.

19 de BOOR C. A practical guide to splines[M]. New York: Springer-Verlag, 1978.

20 COX M G. The numerical evaluation of B-splines[J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 1972, 10(2): 134 - 149.

21 DIERCKX P. Curve and surface fitting with splines[M]. Oxford: Oxford University Press, 1995.

22 TAO Jin, SUN Qinglin, ZHU Erlin, et al. Quantum genetic algorithm based homing trajectory planning of parafoil system[C]// Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese. IEEE, 2015: 2523 - 2528.

23 ZHANG Q, QIU H. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(2): 639 - 646.