

步行船式车辆行走稳定性的比较研究*

洪添胜 张泰岭 罗锡文 区颖刚 邵耀坚

(华南农业大学)

摘要 为研究适用于沿海松软滩涂牧草地上作业机器的行走机构, 达到既不缠草又能利用草根推进的目的, 提出了步行船式车辆行走机构。该文对六腿两相位、八腿两相位和十二腿四相位步行船式车辆的质心高度的跳动、前进速度的波动、行走方向的摆动以及步行船式车辆左右摇动进行比较分析, 讨论了步行船式车辆的结构及土壤条件对步行船式车辆行走性能的影响及其改善途径。
关键词 步行船式车辆 步行腿 行走稳定性 土壤

我国海岸线长, 拥有滩涂资源近 2700 万 hm^2 。许多沿海滩涂适宜种植“互生花大米草” (*Spartina alterniflora*), 它是粗生易长的优质牧草^[1]。但滩涂牧草非常松软, 又有草及草根, 作业机器的行走机构要达到既不缠草又能利用草根推进和下陷少的目的。我们提出了步行船式车辆——一种非常规行走机构的车辆, 它由步行腿机构和船体两大部分组成。步行腿机构由驱动曲柄、步行腿、滑道等组成^[2]。步行腿由三段组成: 上段为长度不断变化的 L_1 , 下段为 L_2 (包括可以更换的脚齿) (见图 1)。

步行船式车辆主要是要解决在特殊地面条件下车辆的通过性问题。由于其结构的影响, 即使在平整的地面上, 它的行走也存在稳定性问题。因此有必要对它的稳定性进行分析, 以寻求解决其稳定性问题的途径。为讨论方便, 本文分析以平坦的硬地面为条件。

1 步行船式车辆的行走原理

以六腿步行船式车辆为例, 从图 1、图 2a 和表 1 所示, 在坚实、平坦的地面条件下, 可看出六腿步行船式车辆的行走原理为:

- 1) 步行船式车辆一边的前、后腿与另一边的中间腿具有相同的运动规律, 即一边的中间腿与前、后腿的运动相位差为 180° ; 两边对称腿之间也相差 180° 的运动相位。
- 2) 在曲柄转角 ωt 为 90° 和 270° 时, 步行船式车辆的六条腿同时着地, 这是换腿的临界状态, 即先与地面接触的三条步行腿将离开地面, 而另三条步行腿则刚接触地面, 六条腿同时着地的时间很短。
- 3) 在其它情况下, 步行船式车辆总是在具有相同运动规律的三条腿 (同相位的腿, 如 1, 3, 5 腿或 2, 4, 6 腿与另一边的中间腿) 作用下与地面相接触, 而相应的另三条腿离开地面。步

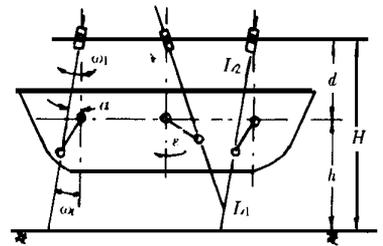


图 1 六腿步行船式车辆示意图

Fig 1 Diagram of the six-legged walking boat-vehicle

收稿日期: 1998-10-12

* 国家自然科学基金 (59475025) 和广东省自然科学基金 (960457) 资助项目

洪添胜, 博士, 教授, CSAE 高级会员, 广州市天河区五山街 华南农业大学工程技术学院, 510642



行腿(脚齿)着地的作用,一是起支撑步行船式车辆的作用,使它处于稳定、平衡状态;二是步行腿(脚齿)与地面间的相互作用产生推进力,驱动步行船式车辆前进或后退。步行船式车辆的六条步行腿的相互协调和配合,使步行船式车辆能够得到支撑和行走。从中可看出,步行船式车辆行走的最基本的结构是六腿两相位。

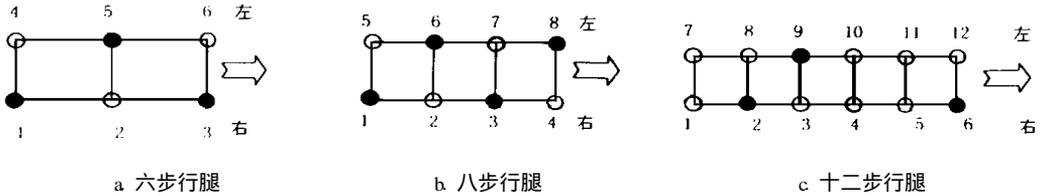


图 2 步行腿起始状态和编号示意图

Fig. 2 Starting state and numbering of walking legs

表 1 步行腿运动规律

Tab. 1 Kinematical rule of walking legs

a. 六步行腿		曲柄转角 $\omega t / (^\circ)$							
相位	腿号	0/360	45	90	135	180	225	270	315
1	1, 3, 5	●	●	⊙	○	○	○	⊙	●
2	2, 4, 6	○	○	⊙	●	●	●	⊙	○

b. 十二步行腿		曲柄转角 $\omega t / (^\circ)$								
相位	腿号	0/360	45	90	135	180	225	270	315	
1	2, 6, 9	●	⊙	○	○	○	○	○	⊙	
2	7, 11, 4	○	○	○	○	○	⊙	●	⊙	
3	1, 5, 10	○	○	○	⊙	●	⊙	○	○	
4	8, 12, 3	○	⊙	●	⊙	○	○	○	○	

注: ● 腿垂直并与地面接触; ○ 腿垂直并不与地面接触;
 ● 腿与地面接触; ○ 腿不与地面接触;
 ⊙ 腿将离开地面; ⊙ 腿刚与地面接触。

2 步行船式车辆的质心高度跳动分析

2.1 六腿步行船式车辆的质心高度跳动

从图 1 可以看出,步行船式车辆的质心高度是变化的,并假定 C 点为步行船式车辆的质心高度位置点。由于步行腿机构象一种变半径的轮子,所以步行船式车辆在行走过程中,其质心会产生上下波动。

若在坚实的地上行走的步行船式车辆,其质心离地面的高度 h 为

$$h = H - d = ((L_1 + L_2) \cos \alpha) - d = ((L_1 + L_2) (d + R \cos(\omega t)) / L_1) - d \quad (1)$$

式中 α —— 步行腿摆角, $\alpha = \omega t$, $\cos \alpha = (d + R \cos(\omega t)) / L_1$; L_1, L_2 —— 步行腿长, $L_1^2 = d^2 + R^2 + 2Rd \cos(\omega t)$; ω —— 步行腿摆动角速度; R —— 曲柄半径; d —— 机架高

度; ω —— 曲柄角速度。

当 $\omega t = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 时, 即接地的步行腿与地面垂直时, 六腿两相位步行船式车辆质心高度达到最高, 为 $h_{\max 6腿} = (L_1 + L_2) - d$; 当 $\omega t = 90^\circ, 270^\circ$ 时, 即六条步行腿同时与地面接触, 处于交替腿状态, 此时车辆质心高度为最低, $h_{\min 6腿} = (L_1 + L_2)d/L_1 - d$ (见图 3a)。图 3a 上方相位 1、2 1 的包络点组成六腿步行船式车辆质心高度跳动的包络图。

2.2 八腿步行船式车辆的质心高度跳动

八腿步行船式车辆的结构是在六腿结构的基础上, 左右每边各增加一条腿, 1、3、6、8 腿为第 1 相位, 2、4、5、7 腿为第 2 相位, 两个相位差为 180° (见图 2b)。将表 1 中的腿号相应调整, 它的运动规律与六腿步行船式车辆完全相同。

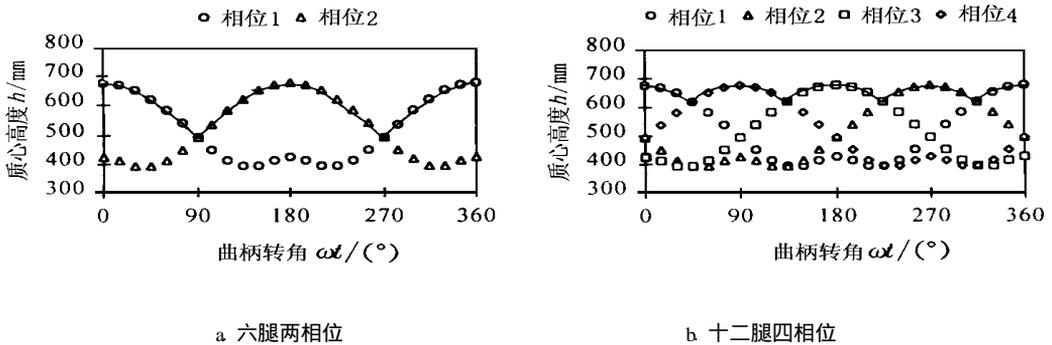


图 3 步行船式车辆的质心跳动

Fig. 3 Variation of mass center height of the walking boat-vehicle

2.3 十二腿步行船式车辆的质心高度跳动

若将步行船式车辆的步行腿改为十二条, 并将它们分成四个相位, 每个相位三条腿(包含左右腿), 各相相位差为 90° ; 步行腿状态和运动规律如图 2c 和表 1b 所示。

图 3b 中上方相位 1、4、3、2、1 的包络点组成十二腿步行船式车辆的质心高度跳动包络图。从表 1 和图 3b 中可看出, 车辆的质心高度在曲柄转角 $\omega t = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 和 360° 时为最高, 这时接地腿与地面呈垂直状态。在曲柄转角 $\omega t = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 时, 即相位 1 和相位 4、相位 4 和相位 3、相位 3 和相位 2、相位 2 和相位 1 的步行腿处于交替接地状态, 车辆的质心高度为最低, 即 $h_{\min} = (L_1 + L_2)(d + 0.707R)/L_1 - d$, 该值比六腿车辆值大, 由于车辆的质心高度 $h_{\max} = (L_1 + L_2) - d$ 与六腿车辆相同, 所以, 十二腿步行船式车辆的质心高度跳动幅度较小, 其原因在于步行腿为四相位, 相位差为 90° ; 腿交替工作时 ωt 为 $45^\circ, \cos(\omega t) = 0$ 。相反, 六腿步行船式车辆的步行腿为两相位, 相位差为 180° ; 腿交替工作时 ωt 为 $90^\circ, 270^\circ, \cos(\omega t) = 0$, 式(1)值为最小, 使得车辆质心下降较多, 跳动较大。

3 步行船式车辆前进速度波动分析

3.1 六腿步行船式车辆的前进速度波动

假设步行船式车辆的步行腿在无滑动的情况下, 其水平的理论速度为

$$v_h = \omega(L_1 + L_2)\cos\alpha \tag{2}$$

式中 v_h —— 步行船式车辆步行腿的水平理论速度; ω —— 步行腿摆动角速度。

$$\omega = \omega(1 + \lambda\cos(\omega t)) / (1 + \lambda^2 + 2\lambda\cos(\omega t)), \lambda = d/R。$$

因此, 步行船式车辆理论前进速度 v 又可表示为



$$v = \frac{\omega(1 + \lambda \cos(\omega t))}{1 + \lambda^2 + 2\lambda \cos(\omega t)} \cdot \frac{(\sqrt{R^2 + d^2 + 2Rd \cos(\omega t)} + L_2)(d + R \cos(\omega t))}{\sqrt{R^2 + d^2 + 2Rd \cos(\omega t)}} \quad (3)$$

步行船式车辆的理论前进速度是各相位步行腿水平的理论速度的组合。六腿步行船式车辆每一边的前后腿与中间腿相位相差 180° ；而每一边的中间腿与另一边的前后腿的运动完全相同（即 1、3 腿或 2、4、6 腿）。假定在坚实地面条件下，讨论步行船式车辆某一边（右边）1、2、3 腿的运动。如图 2a 和表 1(a) 所示，右边的起始状态 ($\omega t = 0$) 是 1、3 腿接地，2 腿处于最高位置，此时步行船式车辆的理论速度（见式 (3)）为图 4a 中相位 1 的包络点，($0^\circ \leq \omega t < 90^\circ$)；当 $90^\circ \leq \omega t < 270^\circ$ ，1、3 腿离开地面，2 腿落地，此时步行船式车辆的理论前进速度为图 4a 中的相位 2 的包络点，其与相位 1 的相位相差 180° ；当 $270^\circ \leq \omega t < 360^\circ$ 时，步行船式车辆的理论前进速度又回到相位 1 的包络点上。图 4a 上部的相位 1、2、1 的包络点为六腿步行船式车辆的理论前进速度包络图，而此包络图下部的点则为步行腿空行（即步行腿离开地面）时的速度图。

从六腿步行船式车辆的理论前进速度图看出，其前进速度的波动是由于步行腿的结构所致。速度最低点 v_{\min} （相位 1 包络点与相位 2 包络点的交点）出现在步行腿换腿工作时，即 $\omega t = 90^\circ$ 和 270° 时，这时右边三条腿（亦即六腿步行船式车辆的全部腿）同时与地面相接触；速度的最高点 v_{\max} 出现在 $\omega t = 0^\circ, 180^\circ$ 和 360° 时，此时步行腿与地面垂直接触。

八腿步行船式车辆的前进速度波动情况与六腿车辆完全相同，在此不再重述。

3.2 十二腿步行船式车辆的前进速度波动

十二腿四相位，步行车辆的理论前进速度包络图由相位 1、4、3、2、1 的包络点组成，即图 4b 中相位 1 的 $\omega t = 0 \sim 45^\circ, 315^\circ \sim 360^\circ$ 段；相位 4 的 $\omega t = 45^\circ \sim 135^\circ$ 段；相位 3 的 $\omega t = 135^\circ \sim 225^\circ$ 段和相位 2 的 $\omega t = 225^\circ \sim 315^\circ$ 段。车辆的前进速度包络点变得平滑，波动变小。步行腿与地面接触的交替点分别出现在曲柄转角 ωt 为 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ 和 315° 处，这时也是车辆速度的最低点，比六腿车辆速度高，即 $v_{\min 12腿} > v_{\min 6腿}$ 。

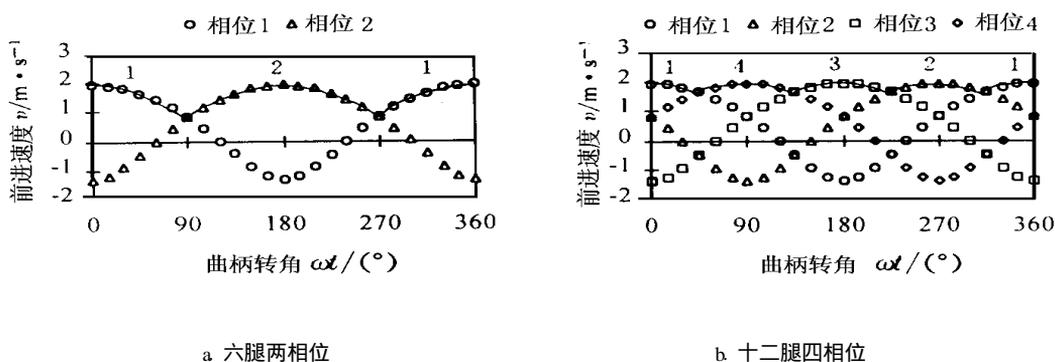


图 4 步行船式车辆前进速度图

Fig. 4 Forward velocity of the walking boat-vehicle

车辆速度的最高点在曲柄转角 ωt 为 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 和 360° (0°) 处，与六腿步行船式车辆的速度相同，即 $v_{\max 12腿} > v_{\max 6腿}$ 。

4 步行船式车辆的行走方向摆动分析

4.1 六腿步行船式车辆的行走方向摆动

在上述分析中，可以看出，六腿步行船式车辆行走的大部分时间是由一边的前后腿与另一边的中间腿驱动。若每条腿产生同样大小的驱动力和运动阻力，那么车辆左右两边对纵轴所产

生的力矩是不平衡的, 由此而产生一个偏转力矩 M 见图 5a 和式(4)

$$M = \frac{[(T_1 + T_3 - T_5) - (F_1 + F_3 - F_5)]B}{2} \quad (4)$$

式中 T ——腿的推进力; F ——腿的行走阻力, 下标 1, 3, 5 分别表示腿号; B ——左右腿距离。

当左右两边单、双腿交替后, 便产生一相反的偏转力矩。偏转力矩的交替改变方向, 将会引起车辆前进时纵向往右摆动(即产生“S”形行走现象)。

4 2 八腿步行船式车辆的行走

方向摆动

若步行船采用八腿两相位形式, 车辆左右两边与地面相互作用的腿数相同, 假如每条腿产生同样大小的驱动力 T_i 和运动阻力 F_i (见图 5b), 那么车辆左右两边对纵轴所产生的力矩是平衡的, 即 $M = 0$ 。从而能保证步行船式车辆的直线行走而不产生车辆的行走方向摆动。

$$M = \frac{[(T_2 + T_4 - T_6 - T_8) - (F_2 + F_4 - F_6 - F_8)]B}{2} = 0 \quad (5)$$

4 3 十二腿步行船式车辆的行走方向摆动

十二腿四相位步行船式车辆的纵向受力与六腿车辆相类似(见图 5a 和式(4)), 即在大部分时间里只有三条腿(一边两条腿, 以及另一边的一条腿)与地面相互作用, 同样会产生行走方向摆动, 产生“S”形行走现象; 由于其相位比六腿车辆多一倍, 在一个周期里换腿次数多一倍, 行走方向摆动频率较高, 但摆动幅值较小。

5 步行船式车辆的左右摇动分析

5 1 六腿步行船式车辆左右摇动分析

从上面的分析可看出, 在大部分时间里, 六腿两相位步行船式车辆的质量由三条腿支承。若在坚实路面的条件下, 车辆的两边基本能保持水平; 若地面较为松软, 单腿支承一边的下陷量将会比双腿支承边的下陷大, 将引起车辆的左右摇动; 若步行船式车辆在滩涂、沼泽地等极松软地面上行走, 由于步行腿的下陷, 船底将与地面相接触, 车辆的质量主要由船体支撑, 使步行船式车辆的左右倾斜和质心波动会大大减少, 车辆的稳定性比硬地面和较松软地面好。这是步行船式车辆在极松软地面上行走的优点。

5 2 八腿步行船式车辆左右摇动分析

在任何时刻, 八腿两相位步行船式车辆左右两边都有相同数量的步行腿与地面接触, 若左右两边的土壤坚实度相同, 则该车辆不会发生左右摇动现象。

5 3 十二腿步行船式车辆左右摇动分析

由于十二腿四相位步行船式车辆平常工作时象六腿车辆一样, 左右两边支撑的腿数不相等, 在松软地面上步行腿左右两边的下陷量不同, 从而使十二腿四相位步行船式车辆同样会产生左右摇动现象。但是, 在一个工作周期内, 两个相位的腿同时与地面接触的次数比六腿车辆多一倍, 这时, 左右两边各有三条腿支撑, 十二腿四相位步行船式车辆比六腿两相位步行船式

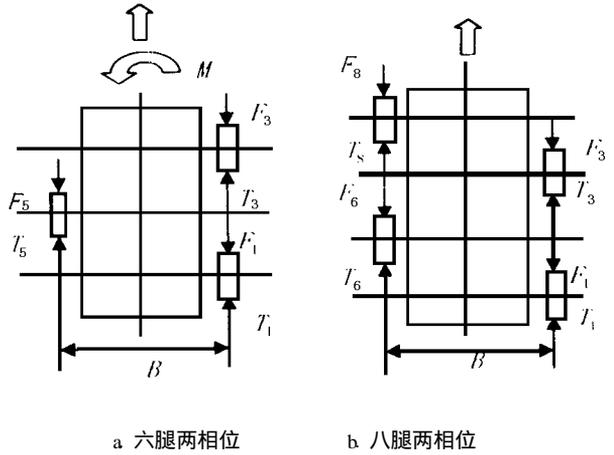


图 5 步行船式车辆纵向受力图

Fig 5 Longitudinal forces of the walking boat-vehicle

车辆左右摇动现象略有减弱。

6 讨论与结论

1) 步行船式车辆的最简结构为六腿两相位, 但它的质心高度跳动、前进速度波动、车辆行走方向摆动幅值和车辆左右摇动现象较十二腿四相位步行船式车辆大;

2) 车辆左右相等数量的同相的步行腿行走机构(如八腿两相位)能改善步行船式车辆的直线行走性能, 即行走方向摆动小; 在较松软的地面条件下, 能克服车辆左右摇动的问题。但前进速度波动和质心高度跳动幅值与六腿两相位相同;

3) 十二腿四相位的行走机构能使步行船式车辆的前进速度波动变小; 车辆质心高度跳动频率较高, 但幅值较小; 行走方向摆动幅值比六腿两相位低; 在较松软的地面条件下, 同样存在车辆左右摇动问题;

4) 在极松软的地面条件下, 步行船式车辆船体与地面相接触, 其质心高度跳动大大减弱;

5) 若将六腿两相位步行船式车辆的中间腿(即腿 2 和腿 5) 的脚齿增大尺寸, 使步行船式车辆两边产生相等的推进力和阻力, 其行走方向不产生摆动("S"行走); 在较松软地面条件下, 步行船式车辆两边的下陷量相等, 不引起其左右摇动。综合考虑六腿两相位步行船式车辆的简单结构以及利用此方案对其行走性能的改善, 认为步行船式车辆使用六腿两相位行走机构是较经济和合理的。

参 考 文 献

- 1 卢小良, 何清, 吴万春. 互生花大米草引种利用研究初报. 广东农业科学, 1993(2): 42~43
- 2 洪添胜, 区颖刚, 张泰岭等. 步行船式车辆行走机构的运动分析. 华南理工大学学报, 1996, 24(增): 159~163

A Comparative Study on Running Stability of Walking Boat-Vehicle

Hong Tiansheng Zhang Tailing Luo Xiwen Ou Yinggang Shao Yaojian

(South China Agricultural University, Guangzhou)

Abstract A specific walking mechanism for boat-vehicles is designed to improve the walking ability of machines working on soft land of forage grass in coastal areas making use of grass roots to produce thrust rather than being wound by them. The mass center height, forward velocity, running direction and vehicle transversal stability of a six-leg two-phase, an eight-leg two-phase and a twelve-leg four-phase walking boat-vehicles were compared and analyzed in this paper. Influences of the structure of these walking boat-vehicles and soil conditions on their running performances and some innovations were also discussed. The simple structure and good walking performance lead to the conclusion that the six-leg two-phase walking mechanism is relatively economical and reasonable.

Key words walking boat-vehicle, walking leg, running stability, soil