

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.002

## 智能爪式复合行驶装置的实现策略

邹积斌

(大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对以往战斗车辆行驶装置为单一的轮式或履带行走方式的弱点, 为更加适应战场作战任务的要求, 通过模仿爪类动物的爪腿功能, 采用智能机电一体化技术, 设计一种液压马达驱动机构的大转矩智能爪腿。研制具有智能爪—履带复合行驶装置, 并应用到一种单兵坦克上。该装置具有爬山、跨越壕沟和上下楼梯的功能, 具有快速进攻与有效防护的特点, 可在复杂地形和恶劣气候条件下使用。结果表明, 该策略能够为现代步兵中单兵具备更强跨越障碍和全天候的机动作战能力提供一种基本的装备支持。

**关键词:** 智能爪; 智能控制; 机电一体化; 复合行驶装置; 单兵坦克

**中图分类号:** TP273+.5 **文献标识码:** A

## Implementation Strategy of Complex Mobile Mechanism with Intelligent Claw

ZOU Ji-bin

(School of Energy & Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Aiming at weaknesses of campaign vehicle mobile mechanism with single wheel or apron wheel, to better meet the requirements of battlefield combat missions, through functions of animal's claw and intelligent electromechanical integration technology, a sort of high torque intellectual claw of hydraulic motor drive mechanism are design. Design the intelligent claw-apron compound driving equipment, and use it on the single soldier tank. The equipment can climb mountains, stride ditches, up and down stairs. It can quickly attack and effectively defend under the conditions with complicated landscape and rough-weather. The result shows that the strategy can provide powerful ability to go through obstacles and the maneuverability of battle in all weather as fundamental.

**Keywords:** Intelligent claw; Intelligent control; Electromechanical integration; Complex mobile mechanism; Single soldier tank

### 0 引言

坦克装甲战斗车辆运动实现的好坏则取决于行驶装置, 特别是在沙漠、沼泽及丘陵起伏地带等特殊地面。为了实现更强和某些特殊行驶功能, 智能化复合行驶装置尤为必要。研制一种具有智能爪—履带复合行驶装置, 该装置主要有智能控制技术, 车载智能泵源系统, 液压马达与行星机构及履带等组成, 并具有智能、高压、大功率、体积小、节能等特点。在智能控制器的控制下使智能爪腿具有单独行驶和复合行驶的功能, 用于装备一种称为智能爪式单兵坦克上, 以解决步兵中的单兵作战时负载过重、体力消耗大、战斗力不足和伤亡率高的不足, 满足新时期军事需求。

### 1 单兵坦克与智能爪复合行驶

#### 1.1 总体简述

智能爪腿具有 6 个自由度, 并安装有各种传感器, 具备大转矩多功能特点。在控制上采用了上、下位机的二级分布式结构, 上位机应用智能控制技

术, 下位机使用常规自动控制技术, 其主要特征具有智能单独和复合行驶功能, 该装置用于装备在具有信息化和轻型化, 同时能够集火力、机动和防护于一体的现代武器装备上<sup>[1]</sup>。如图 1, 1—前端智能爪腿, 2—机枪, 3—单兵, 4—驾驶舱, 5—后端智能爪腿, 6—隐形车体, 7—履带。除坦克的基本组成<sup>[2]</sup>外还主要包括: 1) 智能爪—履带复合行驶装置; 2) 感知系统; 3) 智能控制系统。

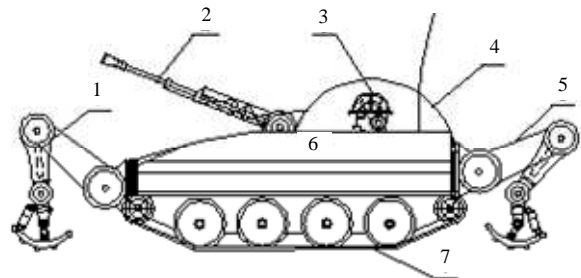


图 1 智能爪式单兵坦克示意图

#### 1.2 智能爪行驶装置特点

在单兵坦克的车体上安装有 4 条智能爪腿, 分别位于车体前、后端的左右位置, 4 条智能爪腿在 3

收稿日期: 2009-07-07; 修回日期: 2009-08-31

作者简介: 邹积斌 (1958-), 男, 山东人, 高级工程师, 从事能源与环境、动力与节能研究。

维空间内能够沿着各爪腿的关节在顺、逆时针方向以大转矩独立或同时与履带协调工作。智能爪式单兵坦克容易操作, 在对环境作出相关的规定和改变的情况下, 就能有目的行驶并完成相关的爪腿功能。采用复合行驶装置既能兼顾单一行驶的优点, 又能消除其存在的不足, 以达到现代坦克, 装甲战斗车辆的战技指标要求, 极大地提高单兵对未来战场上的机动行驶能力。

## 2 智能爪的构成与功能

### 2.1 爪类动物爪腿结构

模仿爪类动物(狗、猫、虎、豹、狮等)的爪腿功能, 并从狗的解剖学中知道, 犬骨骼的四肢骨分为前肢骨和后肢骨。前肢骨主要包括: 1) 肩胛骨、2) 肱骨、3) 前臂骨(桡骨和尺骨)、4) 掌骨、5) 趾骨和爪突。关节主要包括: 肩关节、肘关节、腕关节。

狗的运动系统是由骨骼、关节、肌肉和神经所组成。神经系统触发和调节肌肉的运动, 神经把指令传到肌肉, 再由其牵动四肢骨运动。而肌肉是机体活动的动力器官, 骨骼肌附着在骨骼上, 通过收缩牵引骨骼, 引起机体运动。

### 2.2 智能爪腿的构造

对应于犬前肢骨的骨骼结构和功能, 智能爪腿构成<sup>[3]</sup>如图 2, 0 爪尖通过 4 爪尖油缸的作用绕 2 爪尖转轴转动; 3 爪掌与 8 伸缩式爪腿交接(关节 1), 9 小腿内部设置 8 伸缩式爪腿, 9 小腿与 14 大腿交接(关节 2); 14 大腿与 18 大腿底座交接(关节 3), 并在 3 个关节中设置有液压马达 5、11、17 和行星架 6、13、15 及关节位置传感器 7、12、16, 以构成液压马达一行星变速机构的驱动元件。18 大腿底座与固定在车体上 19 固定底盘转动连接, 18 大腿底座与 20 底座转轴为一体, 利用车体内部液压马达使 14 大腿在顺、逆时针方向任意转动  $0 \sim 200^\circ$ 。

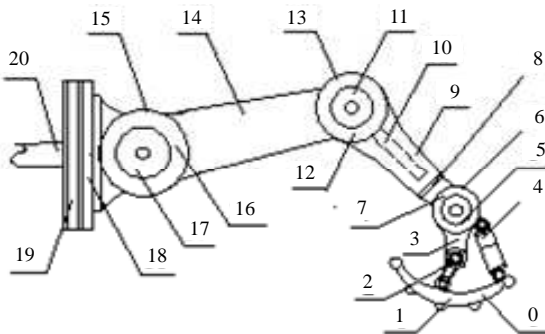


图 2 智能爪腿构成示意图

智能爪腿的设计主要包括控制和行走两个方面。其中, 0 爪尖与 3 爪掌交接为一个自由度, 3 爪掌与 8 伸缩式腿交接为一个自由度, 8 伸缩式腿与 9 小腿具有纵向移动自由度, 9 小腿与 14 大腿交接为一个自由度, 14 大腿与 18 大腿底座交接为一个自由度, 18 大腿底座与 19 固定地盘转动为一个自由度。从而使智能爪腿在三维空间能够作抬爪、落爪、侧向摆动、屈伸及复合动作, 以此能够完成行驶和特殊功能。

在智能爪尖上安装有<sup>[4]</sup>: 1) 触觉传感器, 通过触觉来完成与外界环境的作用和感知, 检测冲击、压迫等机械刺激的综合感觉; 2) 六轴力觉传感器, 主要控制作用于爪腿的任意方向的负载分量; 3) 关节位置传感器, 检测爪腿之间的可变位置和角度。

### 2.3 爪腿液压大转矩设计

#### 2.3.1 车载智能泵源系统

智能泵源<sup>[5]</sup>是基于负载传感原理, 根据负载的状况自动地调节泵的输出, 使其与负载形成较理想的流量、压力和功率匹配, 从而降低整个系统的无效功耗, 提高系统的效率, 降低系统的温升, 表现极强的柔性和适应性。对智能爪式单兵坦克而言, 要求液压泵源的最高工作压力和流量的时间仅为满足在全速行驶、爬山、跨沟等做特殊功能的需求, 而其余工作状态为最大工作压力和流量的 30%~60% 均能得到满足。

智能泵源主要由公管液子系统计算机、微控制器、电液伺服变量机构、液压泵、集成式传感器等 5 个部分组成, 其中, 微处理器、电液伺服变量机构、轴向柱塞泵、集成式传感器 4 个部分构成智能泵。根据车载工作任务设定的工作模式和输入给定量的智能泵源系统, 其控制与管理实际上是一个递阶计算机控制系统, 由上位机, 下位机构成。根据任务需要选择工作模式并自动设定相应的输入量(压力、流量或负载敏感压差), 实现对功率利用情况的实时有效管理。

#### 2.3.2 液压马达与行星机构

1) 柱塞液压马达: 智能爪腿关节的驱动采用 LY-A2F 系列液压马达, 具有高压、大功率、体积小、节能等特点。该液压马达的输出转数(正、反转)和流量成正比而与排量成反比, 输出扭矩随高与低压侧之压差的增大而增大。当  $V_g = 22 \text{ ml/r}$ ,  $n = 5\ 600 \text{ r/min}$ ,  $\Delta p = 35 \text{ MPa}$ ,  $\eta_v = 0.95$ ,

$$\eta_m = 0.9, \eta_t = 0.85;$$

$$\begin{aligned} \text{该液压马达输入流量: } Q &= V_g \times n / 1000 \times \eta_v \\ &= 22 \times 5600 / 1000 \times 0.95 = 129.7 \text{ l/min} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{输出转速: } n &= Q \times 1000 \times \eta_v / V_g \\ &= 130 \times 1000 \times 0.95 / 22 = 5613.6 \text{ r/min} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{输出扭矩: } M &= 0.159 \times V_g \times \Delta P \times \eta_m \\ &= 0.159 \times 22 \times 35 \times 0.9 = 110.2 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{输出功率: } P &= Q \times \Delta P \times \eta_t / 60 \\ &= 130 \times 35 \times 0.85 / 60 = 64.5 \text{ kw} \end{aligned} \quad (4)$$

2) 星行变速机构：从单排行星传动<sup>[6]</sup>的运动学可知，当齿圈制动（ $n_R = 0$ ），太阳轮（ $n_S$ ）为输入，行星架（ $n_{PC}$ ）为输出，该变速机构的传动比为： $i = n_S / n_{PC} = 1 + K = 2.3 \sim 5$ ，（ $4/3 \leq K \leq 4$ ）。

从单排行星传动的动力学可知，单行星排的实际扭矩（忽略惯性力矩）关系式为：

$$M_S^A = M_R^A / K \eta_c^x = M_{PC}^A / -(1 + K \eta_c^x) \quad (5)$$

式中： $K = Z_R / Z_S$ ，即齿圈齿数与太阳轮齿圈之比； $M_S^A$ —行星轮对太阳轮实际作用力矩； $M_R^A$ —行星轮对齿圈实际作用力矩； $M_{PC}^A$ —行星轮对行星架实际作用力矩； $\eta_c = \eta_0 \eta_i = 0.98 \times 0.99 = 0.97$ ，为行星排效率。

在爪腿关节中的液压马达输出轴联接着行星减速器的太阳轮，每个星行机构的齿圈与伸缩式爪腿（关节1）、大腿（关节2）、大腿底座（关节3）构成一体。而每个行星架分别与爪掌，小腿，大腿连为一体，以此构成智能爪腿关节1、2、3的变速机构，使爪腿在液压马达驱动下能以大转矩正、反向转动。

## 2.4 爪腿关节转矩与负载估算

### 2.4.1 关节转矩与功率分析

当使用星行变速机构作为爪腿关节变速器时，根据式(5)可求得爪腿的实际转矩。

式中： $M_{PC}^A = -M_{PC}^A$ ， $M_{PC}^A$ 为内转矩， $M_{PC}^A$ 为行星架输出实际转矩。

对于单排行星排传动<sup>[6]</sup>，当行星排闭锁时，只有牵连运动，全部功率通过牵连运动来传递。则牵连运动传递的功率为：

$$N_y = F_S' V_{PC} = F_S' R_S \omega_{PC} = M_S' \omega_{PC} = M_S' 2\pi n_{PC} \quad (6)$$

式(6)中： $F_S'$ 为太阳轮对行星轮圆周力； $V_{PC}$ 为牵连运动的圆周速度； $R_S$ 为太阳轮对行星轮的圆

周力的作用半径； $\omega_{PC}$ 为牵连角速度，即行星架角速度； $n_{PC}$ 为行星架转速； $M_S'$ 为液压马达的输出转矩。

### 2.4.2 爪腿的负载估算

以智能爪大腿关节3为例：设爪大腿的工作长度： $L1=1 \text{ m}$ ，小腿的工作长度： $L2=0.5 \text{ m}$ ，爪掌工作长度： $L3=0.3 \text{ m}$ 。以车体战斗全质量为2000 kg，发动机额定功率为200 kw时，采用LY-A2F系列液压马达作为智能爪腿的驱动元件，在使用3个单排行星排串联变速传动时，根据式(1)~式(6)：

式中：设 $M_S^A = M$ 作为液压马达输出到第1个单排行星排太阳轮的输入扭矩； $M_{PC}^1$ 作为第1个单排行星架输出到第2个单排行星排太阳轮的输入扭矩； $M_{PC}^2$ 作为第2个单排行星架的输出到第3个单排行星排太阳轮的输入扭矩。

由式(5)得： $M_{PC}^A = M_S^A (1 + K \eta_c^x)$ ，式中： $K = K_Z^1 = K_Z^2 = K_Z^3 = Z_R / Z_S \leq 4$ 。

从式(6)得：

$$N_y = M_S' \omega_{PC} = M_S' 2\pi n_{PC} = M_Z' 2\pi N_{PC}' = F_Z' R_Z' 2\pi N_Z' \quad (7)$$

式(7)中： $M_Z' = F_Z' R_Z'$ ， $\omega_{PC} = 2\pi N_{PC}' = 2\pi N_Z'$ 为第3个单排行星架的输出扭矩和角速度，可计算出爪腿的转矩过程为：

$$M_{PC}^1 = M_S^A (1 + K_Z^1 \eta_c^x) = M (1 + K_Z^1 \eta_c^x) = 110 \times 4.88 =$$

$$536.8 \text{ N}\cdot\text{m}; M_{PC}^2 = M_{PC}^1 (1 + K_Z^2 \eta_c^x) = 2619.6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

当爪大腿长度 $L1=1 \text{ m}$ 为臂长时，它实际具有的作用力为： $F_Z' = M_Z' / L_1 = 1304 / 1.0 = 1304 \text{ kg}$ ；爪腿具有转矩为：

$$M_{PC}^3 = M_Z' = M_{PC}^2 (1 + K_Z^3 \eta_c^x) = 2619.6 \times 4.88 = 12783.6 \text{ N}\cdot\text{m}$$

具有角速度为：

$$\omega_Z' = P / M_Z' = 64500 / 12784 = 5 \text{ rad/s}$$

因此，每条智能爪腿具有1300 kg的负载能力，并可以在1.5~1.8 m（伸缩式腿工作）的三维空间工作，以达到智能爪—履带复合行驶功能和爪腿单独的特殊功能。

## 3 智能复合行驶装置

### 3.1 四爪腿的运动规律

#### 3.1.1 爪类动物奔跑步伐

爪类动物奔跑时不用对角线的方式，而是左前右前，左后有后交换的步伐，即前两足和后两足的

交替。前进时身躯的前、后部有明显的上下跳动，四足的运动充满着弹力。身体的重心落在四爪在地面上所构成的矩形对角线的交点附近，并伴随着前爪、后爪的交换步伐，重心垂线在对角线交点线上的向前、向后移动。

### 3.1.2 智能爪腿稳定性分析

智能爪腿是模仿爪类动物的一种运动方式，在通过山坡、跨沟和上下楼梯中，爪腿的行走机构比传统的轮式或履带行驶装置具有良好的适应性和机动性，在智能控制器的控制下可以完成其行驶目的。而爪腿行走也存在一些不足之处，其运动轨迹不是一条连续的辙迹，不如轮式和履带运动速度快等。为了使爪腿协调而稳定运动，从机械结构设计到控制算法都比较复杂，相比自然界的节肢动物，仿生爪腿的机动性还有一定的差距。

稳定确认直线<sup>[7]</sup>：当车体上的 4 条智能爪腿都着地时，连接左侧前爪和右侧后爪以及左侧后爪和右侧前爪所形成 2 条直线，这 2 条直线将整个平面分为 4 个象限如图 3。车体坐标原点位于其重心，假设任意时刻车体上的 4 条爪腿相对于车体坐标系的位置已知，即 4 条腿坐标已知，则可求出 2 条稳定确认直线的数学方程，以确定车体的重心所在的象限。如果车体的重心在第一象限，那么它下一步行走时就不能抬起 1 腿和 2 腿，否则将导致车体失去平衡而向前倾倒，因此，它下一步行走时必须抬起 3 腿或 4 腿，即重心所在象限决定了车体下一步可以抬起哪条爪腿，亦即要保持单兵坦克稳定运动，则 4 条爪腿的运动顺序是重心位置的函数。

故在四爪腿行走的步态中，采用前两腿与后两腿分别并行行走的步态，并以履带与地面的接触作为中间支撑，再配合四爪腿的行走来构成一个智能爪—履带复合行驶的基本稳定步态。

### 3.2 车载智能控制器

智能爪腿是在单兵指定目标后，由智能控制器独自编制操作计划，依据实际情况确定动作程序，然后把动作变为操作机构的运动。它具有感觉系统、效应器、模拟装置，其中，智能控制器<sup>[8]</sup>最为核心。

作为智能爪式单兵坦克的控制核心部分，智能控制器是影响战技指标的关键部分之一。基本特点为：1) 容易操作：无须对环境做任何规定和改变，有目的地完成相关任务，而相互之间的联系快捷、方便、安全，并便于操作；2) 适应性：对执行任务

的未知环境能作出适应性反应，具有学习、感觉和判断能力，并采用视觉、听觉、触觉等传感器，使其具有感知能力和自主工作的能力。

智能控制器采用上、下位机二级分布式结构，上位机负责整个系统管理及运动学计算、轨迹规划等。下位机为多个通用计算机（智能模块、微控制器），上下位机及下位机间具有相互通讯的功能，该系统各机间通讯采用总线形式，并具有以下特点：

- 1) 采用开放式软、硬件结构，可根据需要方便地扩充功能；
- 2) 根据系统要求和电气特性，按模块化设计硬件，不仅方便了安装和维护，而且提高了系统的可靠性，系统结构也更为紧凑；
- 3) 对于不同的子任务，由不同的功能模块实现，以利于修改、添加、配置功能；
- 4) 控制器必须能在确定时间内完成对外部中断的处理，并可以使多个任务同时进行；
- 5) 利用网络通讯功能，便于实现资源共享。

### 3.3 复合行驶装置特性分析

智能爪式单兵坦克具有 2 套行驶装置，以提高生存和行驶能力。它具有感知环境、思维、动作的“智能机器”，并具有一定适应能力和解决“问题”的本领，相当于动物智能或人类低级的智能，使现代步兵中的单兵具有更强的跨越障碍和机动能力。

#### 3.3.1 复合行驶技术分析

移动方式现有轮式、履带、爬行和腿式，前 3 种实现起来简单方便，而爪腿式运动的研制使行走技术向前推进了一大步。第一，爪腿运动轨迹是离散的足印，轮式和履带的运动轨迹则是一条连续的辙迹。崎岖地形中往往含有岩石、泥土、沙子甚至陡坡等障碍物，可以稳定支撑车体连续路径十分有限，这意味着轮式和履带在这种地形中已经不适用。而爪腿运动时只需要离散的点接触地面，对地形的适应性较强。第二，爪腿的腿部具有多个自由度，使运动的灵活性增强，它可通过调节爪腿的长度保持身体水平，也可以通过调节爪腿的伸展程度调整重心的位置，其稳定性更高。第三，爪腿移动时，车体与地面是分离的，可不必过多考虑地面的状况。

#### 3.3.2 智能爪—履带复合行驶步态

当智能爪式单兵坦克行驶、爬山和跨沟运动时，履带不但能作为正常行驶装置使用，它与地面的接触还可以作为行驶过程的一种辅助方式，以更有利于四条爪腿的行走，以达到和完成各种行驶目的。

(上接第 8 页)

智能爪式单兵坦克的复合行驶步态如图 3，在一个步态周期内描述了各爪腿与履带进行协调行走的过程。图 3(1)爪腿 1、2 同时向前迈出时，爪腿 3、4 和履带 5、6 支撑地面；图 3(2)当 4 条爪腿支撑起车体时，履带 5'、6' 离开地面悬空，车体向前移动；

图 3(3)车体向前移动落地后，一个行走步态完成。

智能爪式单兵坦克的行驶方式有 3 种：1) 传统的履带行驶（4 条智能爪腿位于复位状态）；2) 依靠 4 条智能爪腿行走，并以 2 条履带与地面的接触作为支撑（以面、线、点），协助 4 条爪腿的行走；3) 4 条智能爪腿与履带协调复合行驶。

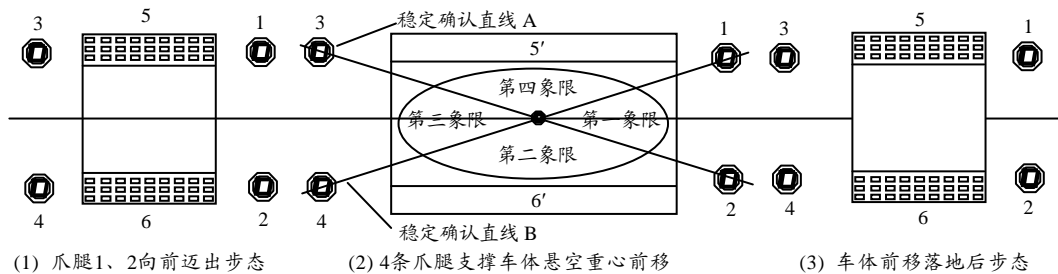


图 3 智能爪式单兵坦克的行驶步态和稳定确认直线

## 4 结束语

该智能爪腿装置容易驾驶，具有快速强攻与有效防护的特点，可在复杂地形和恶劣气候条件下使用。该策略为实现复合行驶和单独行驶功能的智能爪式单兵坦克提供了一种更强跨越障碍和全天候的机动性的行驶装置，可提高单兵及整体步兵的综合作战能力。

## 参考文献：

- [1] 宋振铎, 石鑫, 孙韬. 坦克信息化轻型化与反坦克武器的发展[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 480-484.
- [2] 闫清东, 张连第. 坦克构造与设计(下册)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 1-24.
- [3] 邹积斌. 智能爪式单兵坦克[P]. 中国: 200610120386.5.
- [4] 肖南峰. 智能机器人[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2008: 179-184.
- [5] 李运华, 王占林. 机载智能泵源系统的开发研制[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(6): 493-497.
- [6] 黄宗益. 现代轿车自动变速器原理与设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006: 46-50.
- [7] 刘静, 赵晓光, 谭民. 腿式机器人的研究综述[J]. 机器人, 2006, 28(1): 81-88.
- [8] 李开生, 张慧慧, 等. 机器人控制器体系结构研究的现状和发展[J]. 机器人, 2000, 22(3): 235-240.