

# 运输车队摩托化机动建模与数据处理技术

刘 洋, 孙兆友, 周 磊, 张兴佳

中国人民解放军63861部队, 吉林 白城

收稿日期: 2025年9月28日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年10月28日

## 摘 要

本文立足运输车队编队行驶过程中利用车载设备采集的摩托化机动数据, 通过分析挖掘其中规律, 构建数学模型, 开发车载数据自动处理系统, 高效处理出摩托化分队机动过程中评估所需各种参数。可对摩托化分队机动的组织效果、机动能力进行定量分析, 为车队编队行驶评估数据需求方提供产品化数据。

## 关键词

数学建模, 摩托化机动, 定量分析, 分层加权法

# Modeling and Data Processing Technology for Motorized Maneuver in Transport Convoy

Yang Liu, Zhaoyou Sun, Lei Zhou, Xingjia Zhang

63861 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Baicheng Jilin

Received: September 28, 2025; accepted: October 21, 2025; published: October 28, 2025

## Abstract

This article is based on the motorized maneuver data collected by the vehicle-mounted information collection system during the convoy driving process. By analyzing and mining the patterns, constructing mathematical models, and developing an automatic processing system for vehicle data, various parameters required for evaluation during the motorized team maneuver process can be efficiently processed. It can quantitatively analyze the organizational effect and maneuverability of the motorized team maneuver, and provide product-based data for those who need data on fleet formation driving evaluation.

## Keywords

Mathematics Modeling, Motorized Mobility, Quantitative Analysis, Layered Weighting Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着信息化的发展,物流行业的特种货物运输也从单一的卡车运输转变为有组织的车辆编队行驶。为了能够实现车队在摩托化机动过程中连贯、持续采集位置数据,我们自主开发了自动化采集设备,同时采集了大量的车辆状态数据。如何才能科学、合理、快速处理出有效数据,评估出整个车队的摩托化机动能力,优化行进过程的组织效果,给一线技术人员提出了新的研究课题。

## 2. 基本概念

### 2.1. 摩托化机动相关性

摩托化行进时多个运输梯队在道路上行驶是有组织、高密度、车间距不大的汽车流,车流中除头车以外,任何一辆车的速度均受到前车的制约,驾驶员需根据前车的行驶状态控制相应的车速[1]。因此,行进状态有以下三个特征:

#### 1) 制约性

前车制约后车,后车也反黏着前车。

#### 2) 传递性

前车的运动状态改变,后车的运动状态也随之改变。

#### 3) 延迟性

状态的传递并不是立即发生的,而是会延迟一定的时间。

针对摩托化分队机动的整体出发时间及到达时间、集结部署时间、加速、减速和航向角变化等指标的实际,需要对其含义进行有效界定,在此基础上,根据数据格式和特征,设计算法对其指标进行挖掘计算。

### 2.2. 相关概念界定

- 1) 头车出发时间 TCCF 是梯队的头车按照行进命令指向,从集结状态到达预定速度运动状态的时刻。
- 2) 整体出发时间 ZTCC 是梯队的头车正常行进状态,尾车也达到预定速度运动状态的时刻。
- 3) 启动时间 TCQD 是从头车出发时间到整体出发时间之间的间隔,表征一个梯队需要的整体反应能力。数值上等于头车出发时间与整体出发时间的间隔。
- 4) 头车到达时间 TCDD 是梯队的头车按照行进命令指向,从运动状态到目的地集结状态的时刻。
- 5) 整体到达时间 ZTDD 是梯队的头车处于目的地集结状态,尾车也到达目的地集结地的时刻。
- 6) 集结时间 JJ 是梯队从进行状态集结为静止状态之间的时间,其数值等于车头到达时间与整体到达时间的间隔。
- 7) 部署时间 BS 是梯队从处于集结状态到出发状态之间可用于部署的时间段。
- 8) 集结部署时间 JJBS 是集结时间和部署时间之和。

9) 行进时间  $TT$  是梯队正常行进过程时间段, 即加速状态、匀速状态和减速状态之间切换的时间。

由此可以得到包括头车出发时间、整体出发时间、头车到达时间和整体到达时间的各个时刻, 以及包括部署时间、启动时间、行进时间和集结时间四个时间段的循环模型, 四个时间段包含了整个车队所有的运行状态, 如图 1 所示。



Figure 1. Time cycle model of motorized movement for motor convoys  
图 1. 车队摩托化机动时间循环模型

10) 加速特征包括定量特征和定性特征。定量特征用车辆行驶的加速度来描述。车队除了静止集结状态外, 还有其他状态。

11) 航向角变化特征包括记录航向角的平均值、方差、变化值等。

12) 行进长径  $XJCJ$ , 是在某一时刻点梯队的头车和尾车之间的车队距离。

13) 车辆间距  $CJJ$ , 其数值等于行进长径除以车辆数。

### 3. 摩托化机动数据预处理

由于设备安装可靠性、元器件稳定性等问题, 部分数据难免会有这样那样的格式错误、数值错误, 因此需要对原始数据进行必要的预处理, 保证其数据格式正确性, 数值范围符合装备和地域逻辑性。

#### 3.1. 数据总体检验

总体检验主要是检验数据正确性和可用性, 我们对记录的数据进行总体特征检验, 包括最大值、最小值范围, 缺失、错误、冗余等检验, 目的是保证数据在转入处理阶段的可用性。

#### 3.2. 约束特征检验

数据项记录的是运动实体随着时间发生位置和状态的具体变化, 每一记录项都会受前一段时刻状态的约束, 尤其是体现在经纬度和高程所代表的地理空间位置上。可以分别利用各自特征对多个车队的单项数据进行整体综合比较。以图 2 纬度为例, 对三个车队的数据进行约束性检验。其中横坐标表示数据序号, 纵坐标表示纬度信息。

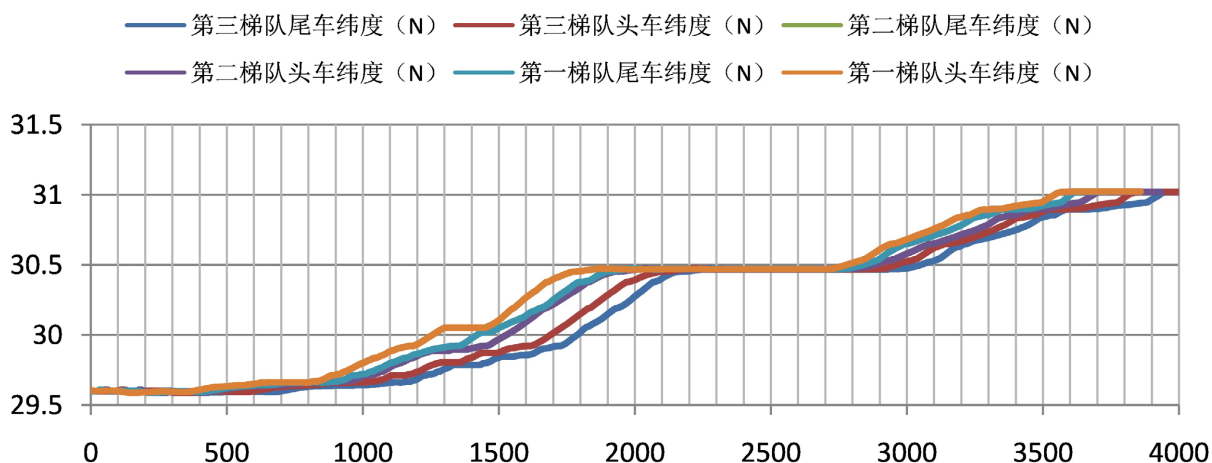


Figure 2. Constraints test results of motorized movement dimension data for each echelon

图 2. 各梯队摩托化机动纬度数据约束性检验结果

### 3.3. 相关特征检测及处理

在采集到的数据变量中具有相关特性的机动数据是机动速度和位置的量化率, 由于机动速度采集的是瞬时记录, 数据变化值可能较大, 仅能代表时刻的状态量, 不能代表该时间间隔中的平均速度。我们需要对直接记录的机动速度(采集速度值)和通过位移计算出来的速度(计算速度)进行比较, 确定采用哪类数据更科学合理。

首先需要将经纬度差值与具体的距离差值进行换算, 通过距离和时间差计算出这时间段的平均速度, 具体计算方法见 3.4 节数据预处理模型。由此可以计算出梯队头车或尾车的速度, 比较计算速度和记录速度, 结果见图 3。其中横坐标表示数据序号, 纵坐标表示头车速度。

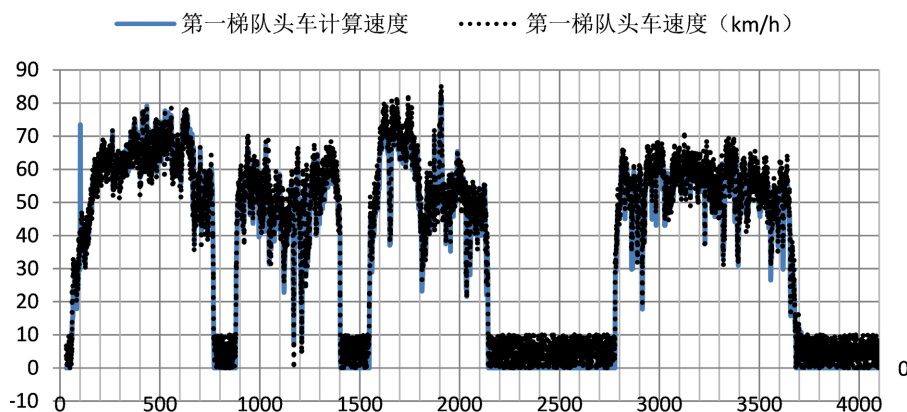


Figure 3. Calculated speed vs. recorded speed of the lead vehicle in the first echelon

图 3. 第一梯队头车计算速度与记录速度

### 3.4. 计算速度数据预处理模型

在实际测量数据中设备记录的速度为瞬时速度, 由于机动过程中颠簸或数据波动可能导致瞬时速度与计算速度差距较大, 而实际数据分析时计算速度往往更接近真实数据, 因此需要求出计算速度[2]。

1) 根据两点经纬度求两点之间的距离

设数据采集记录表中有 A 点(纬度  $\varphi_1$ , 经度  $\lambda_1$ )和 B 点(纬度  $\varphi_2$ , 经度  $\lambda_2$ ), 则

$$d(A, B) = R \cos^{-1} [\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2) + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2] \quad (1)$$

式中  $d(A, B)$  表示  $A$ 、 $B$  之间距离,  $R$  为地球半径, 取值为 6,378,137 米, 经纬度的单位为度。

2) 根据两点距离求速度

已知两点  $(A, B)$  的距离为  $d(A, B)$ ,  $A$  和  $B$  点对应时刻分别为  $t_A$ 、 $t_B$ , 因此两点之间的计算速度为:

$$V = \frac{d(A, B)}{|t_A - t_B|} \quad (2)$$

3) 根据两点的速度求加速度

已知两点  $A$ 、 $B$  的计算速度为  $V_A$ 、 $V_B$ ,  $A$  和  $B$  点的时刻分别为  $t_A$  和  $t_B$ , 加速度  $a$  为:

$$a = \frac{V_B - V_A}{|t_A - t_B|} \quad (3)$$

## 4. 摩托化机动综合评估模型

通过对车队编队行驶摩托化机动评估参数需求的研究, 发现能够影响摩托化机动组织效果[3]和车队机动能力评价结果的指标参数主要有 11 个(启动时间、集结时间、平均速度、速度方差、加速度最大值、加速度最小值、航向角方差、航向角变化值均值、行进长径、车辆间距离、行进长径方差)。一个指标体系由多个子级指标体系构成, 权系数可以通过管理条例或专家组打分的方式获取, 综合得分的高低可对演训组织效果和运输车队编队行驶机动能力进行定量评价。

### 4.1. 指标体系结构模型

分层加权法具有很强的伸缩性, 当评价者对某一类指标有偏好时, 该类别权重向量可以退化为只有一个 1, 其他的都为 0。所以在指标体系建立时, 各级指标体系中的权重向量一般不采纳个人意见, 而是通过遴选在武器使用、作战指挥、战术设计、作战评估等领域的专家打分综合得出。

### 4.2. 单一指标处理

实际评价过程中, 指标的属性可能很多, 有定性指标也有定量指标, 其量纲和取值范围也可能存在很大差异, 甚至有的指标属性没有取值范围, 因此需要对单一指标进行无量纲化或归一化处理, 将其指标都归一化到  $[0, 1]$  区间上。

若指标值越大代表评估效果越好, 例如速度的平均值、位移有效率等, 则进行如下变换:

$$f^* = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (4)$$

若指标值越小代表评估效果越好, 例如长径的平均值、速度方差等, 则进行如下处理:

$$f^* = \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (5)$$

其中  $f_{\max}$  是指标的最大值,  $f_{\min}$  是指标的最小值,  $f$  是处理前的指标值,  $f^*$  是处理后的指标值。

### 4.3. 综合评估指标

当前主流的综合评价算法是层次分析法和层次加权法[4] [5], 层次分析法简称 AHP (Analytic Hierarchy Process), 是上世纪 70 年代中期由美国运筹学家托马斯·赛蒂(T. L. Saaty)正式提出, 它是一种定性和定量结合的系统化、层次化的分析方法。

托化机动中并未涉及到定性特征,全部转化为量化指标分析法相对复杂,如一致性检验无法通过,则其计算复杂性更高,所以本文采用分层加权法。

第一步:根据经验对各指标进行权重赋值,包括类别权重和具体的指标权重。

首先,分别对摩托化的类别权重向量  $TD = [td_1, td_2, td_3, td_4, td_5]$  进行赋值,然后对每类中的具体指标偏好再进行赋值。

第二步:按照以下公式对各类指标得分进行计算:

$$z_i = \sum_{i=1}^b bq_i fv_i \tag{6}$$

其中  $fv_i$  表示归一化后的第  $i$  个具体指标的值,  $bq_i$  表示第  $i$  个具体指标偏好权重,  $z_i$  为该类别指标的得分。

第三步:按照以下公式对综合类指标得分进行计算:

$$Z = \sum_{i=1}^b bq_i z_i \tag{7}$$

其中  $bq_i$  表示第  $i$  类别指标偏好权重,  $Z$  为所有指标的综合得分。

第四步:按照各对象的得分进行综合排序,并给出评价结果。

## 5. 模型设计及实现

### 5.1. 数学模型设计

**Table 1.** Data processing model

**表 1.** 数据处理模型

| 序号 | 算法名称       | 输入                         | 输出        |
|----|------------|----------------------------|-----------|
| 1  | 头车出发时间     | 头车速度, 行驶记录时间               | 头车出发时间    |
| 2  | 整体出发时间     | 头车速度, 尾车速度, 行驶记录时间         | 整体出发时间    |
| 3  | 头车到达时间     | 头车速度, 行驶记录时间               | 头车出发时间    |
| 4  | 整体到达时间     | 尾车速度, 头车速度, 行驶记录时间         | 整体到达时间    |
| 5  | 启动时间       | 头车出发时间 TCCF, 整体出发时间 ZTCC   | 启动时间 TCQD |
| 6  | 行进时间       | 整体到达时间 ZTDD, 整体出发时间 ZTCC   | 行进时间 XJSJ |
| 7  | 集结时间       | 头车到达时间 TCDD, 整体到达时间 ZTDD   | 集结时间 JJ   |
| 8  | 部署时间       | 头车出发时间 TCCF, 上一次整体到达时间     | 部署时间 BS   |
| 9  | 计算速度       | 行进的经度, 行进的纬度, 记录时间         | 计算速度      |
| 10 | 计算加速度      | 行进的速度, 记录时间                | 计算加速度     |
| 11 | 航向角变化值     | 行进的航向角, 记录时间               | 航向角变化值    |
| 12 | 航向角变化率     | 行进的航向角, 记录时间               | 航向角变化率    |
| 13 | 行进长径的第一种模型 | 头车和尾车的经纬度, 头车和尾车记录时间, 查询时间 | 行进长径      |
| 14 | 行进长径的第二种模型 | 头车经纬度, 头车和尾车记录时间, 查询时间     | 行进长径      |
| 15 | 行进长径的第三种模型 | 头车和尾车的经纬度, 头车和尾车记录时间, 查询时间 | 行进长径      |

为了便于数据批量化处理,需要通过构建摩托化机动评估系列数学模型,将大量、连续的测试数据,

参照车队编队行驶评估需要处理出相应的参数[6]。根据历次车队编队行驶参数需求，经综合分析共构建15个数据处理模型，分别计算摩托化分队机动的整体出发时间、到达时间、集结部署时间、加速、减速和航向角变化特征、行进长径等，如表1所示。

5.2. 数据分析

通过表1构建的模型，本文以某运输分队为例，对从A城市到B城市3个梯队的数据进行处理，将影响摩托化评估的相关数据进行统计分析。主要分析时刻类指标、时段类指标、速度类指标、航向角指标、行进长径指标。

- 1) 时刻类指标
- 3个梯队的头车出发、整体出发时间、头车到达时间、整体到达时间和行进时长如表2所示。

Table 2. Temporal indicator results of the three echelons  
表 2. 3个梯队时刻指标结果

| 梯队 | 头车出发时间   | 整体出发时间   | 头车到达时间   | 整体到达时间   |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 1  | 07:34:20 | 07:37:00 | 17:27:10 | 17:47:10 |
| 2  | 07:38:50 | 07:47:20 | 17:53:40 | 18:08:00 |
| 3  | 07:47:30 | 08:00:40 | 18:20:30 | 18:37:50 |

- 2) 时段类指标
- 3个梯队的部署时间、启动时间、行进时间和集结时间如表3所示，此处考虑整个行进途中的时间统计总和。

Table 3. Periodic indicator results of the three echelons  
表 3. 3个梯队时段类指标结果

| 梯队 | 部署时间    | 启动时间    | 行进时间     | 集结时间    |
|----|---------|---------|----------|---------|
| 1  | 1.90 小时 | 0.04 小时 | 10.17 小时 | 0.33 小时 |
| 2  | 1.36 小时 | 0.13 小时 | 10.35 小时 | 0.25 小时 |
| 3  | 1.24 小时 | 0.22 小时 | 10.56 小时 | 0.29 小时 |

- 3) 速度类指标
- 3个梯队速度平均值、速度方差、加速度最大值、加速度最小值、加速度方差值如表4所示。

Table 4. Speed-related indicator results of the three echelons  
表 4. 3个梯队速度类指标结果

| 梯队 | 速度平均值  | 速度方差   | 加速度最大值 | 加速度最小值 | 加速度方差值 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 42.747 | 23.615 | 2.112  | -4.274 | 0.514  |
| 2  | 37.373 | 21.709 | 2.829  | -3.464 | 0.375  |
| 3  | 36.139 | 20.611 | 1.610  | -4.110 | 0.310  |

注：单位(千米/小时)。

4) 航向角指标

3 个梯队航向角的均值、航向角方差、变化值的均值、变化值方差如表 5 所示。

**Table 5.** Heading angle indicator results of the three echelons  
**表 5.** 3 个梯队航向角指标结果

| 梯队 | 航向角均值   | 航向角方差值 | 变化值的均值  | 变化值的方差 |
|----|---------|--------|---------|--------|
| 1  | 121.413 | 38.761 | -0.0638 | 6.280  |
| 2  | 121.413 | 39.505 | -0.064  | 6.280  |
| 3  | 124.341 | 43.750 | -0.047  | 10.034 |

注：单位(度)。

5) 行进长径结果

3 个梯队行进长径的均值、方差值如表 6 所示。因为启动阶段行进长径变化率不能代表整体行进长径的优劣[7] [8]，因此一般取车队整体出发 1800 秒后开始计算，用于评价行进梯队的行进长径。

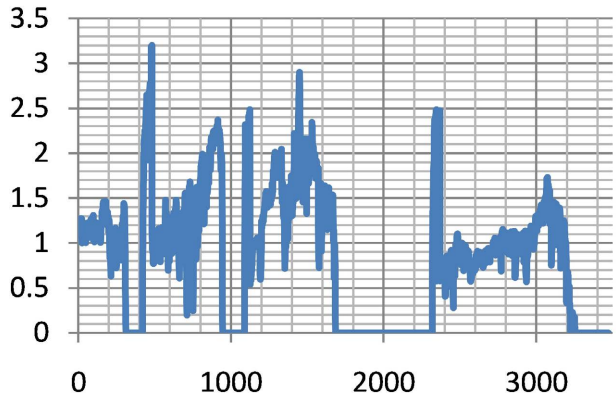
**Table 6.** Long trail results for the three echelons  
**表 6.** 3 个梯队行进长径结果

| 梯队 | 行进长径均值  | 车辆间距  | 行进长径方差  |
|----|---------|-------|---------|
| 1  | 850.50  | 60.75 | 708.10  |
| 2  | 787.40  | 56.24 | 1070.32 |
| 3  | 1059.65 | 75.69 | 705.14  |

注：单位(米)。

5.3. 算法实现

根据不同评估对象需要，剔除小休、中休、大休时间对平均速度的影响[9]；根据需要对在不同路段、不同天候、不同时间的机动数据分段、分时处理，实现不同使用需求，最终通过摩托化机动综合评估模型计算出相应的结果，如图 4 所示，其中横坐标表示数据序号，纵坐标表示梯队行驶误差。



**Figure 4.** Variation of echelon's marching major axis with time  
**图 4.** 梯队行进长径随时间变化情况

## 6. 结束语

本文围绕运输车队摩托化机动过程中的数据处理与评估需求, 基于车载设备采集的机动数据, 通过构建数学模型与开发自动处理系统, 实现了对机动能力与组织效果的定量分析。

本研究构建的摩托化机动建模与数据处理技术, 可快速从海量数据中提取评估所需参数, 为车队编队行驶的组织效果与机动能力提供定量分析手段。该技术通过 15 个数学模型实现数据批量化处理, 提升了评估效率, 为相关领域的实战化评估提供了产品化数据支撑, 对优化车队行进组织具有重要应用价值。

## 参考文献

- [1] 张敏. 基于机动数据的摩托化机动演训组织效果评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2019, 33(3): 31-37.
- [2] Liu, Y., Dai, H., Li, B., et al. (2021) ECMA: An Efficient Convoy Mining Algorithm for Moving Objects. *Proceedings of the 30th ACM International Conference on Information & Knowledge Management*, Queensland, 1-5 November 2021, 1089-1098.
- [3] 于燕婷. STK 软件及其在卫星导航系统中的应用[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(7): 62-65.
- [4] 樊胜利, 张宇飞, 姚涛, 张学民. 武器装备战场毁伤评估方法研究综述[J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(1): 21-26.
- [5] 安飞, 连慧. 层次分析法的专利信息分析[J]. 河南科技, 2018(36): 57-59.
- [6] Baykal-Gursoy, M., Xiao, W., Duan, Z., et al. (2012) Throughput Capacity Estimation for Convoy Movement in Linked Roads. *Journal of Transportation Engineering*, **138**, 9870-9995.
- [7] Chen, X. and Wang, Y. (2016) Detecting Convoys Using License Plate Recognition Data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **17**, 3210-3219.
- [8] Cordeau, J.F., Laporte, G. and Mercier, A. (2000) Solving a Time-Space Network Formulation for the Convoy Movement Problem. *Operations Research*, **53**, 219-230.
- [9] Zhang, L., Chen, H. and Liu, J. (2022) Real-Time Cross-Fleet Pareto-Improving Truck Platoon Coordination.