

货车侧翻原理及其防侧翻动力学分析的研究

孙 锐, 罗 宁, 柴亚博, 董纪伟

中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州
Email: nluo@cumt.edu.cn

收稿日期: 2021年8月2日; 录用日期: 2021年9月2日; 发布日期: 2021年9月13日

摘 要

本文基于两例货车侧翻重大案例, 通过合理简化, 构建出东风重型载货车转弯的动力学模型, 然后通过刚体力学理论与MATLAB分析货车侧翻的主要原因。为了解决货车易侧翻问题, 设计了一种安全气阀和陀螺仪防货车侧翻装置。主要结论包括: 1) 通过刚体力学可以简化分析货车由于转弯、车厢倾斜的侧翻问题, 其结论与实际相符。2) 离心力与转角近似成线性关系; 车速越快, 转角越大, 车厢偏转角度越大, 车辆越容易侧翻。3) 安全气阀和陀螺仪均可提供有效力矩防止侧翻, 其对大货车防侧翻结构设计, 优化设计和安全控制都具有非常重要的指导意义。

关键词

东风重型载货车, 侧翻, 伯努利方程, 安全气阀, 陀螺仪原理

Research on the Principle of Lorry Rollover and Anti-Rollover Device Dynamics Analysis

Rui Sun, Ning Luo, Yabo Chai, Jiwei Dong

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
Email: nluo@cumt.edu.cn

Received: Aug. 2nd, 2021; accepted: Sep. 2nd, 2021; published: Sep. 13th, 2021

Abstract

Based on two major cases of truck rollover, this paper constructs a dynamic model of Dongfeng heavy duty truck turning through reasonable simplification, then through the rigid body mechanics theory and MATLAB, the main reasons for the truck rollover are analyzed. In order to solve the problem of truck rollover, a safety valve and gyroscope are designed to prevent truck rollover. The main conclusions include: 1) Rigid body mechanics can simplify the analysis of the rollover prob-

lem of trucks due to turning and tilting of the carriage. The conclusions are consistent with the actual situation. 2) The centrifugal force and the angle of rotation are approximately linear; the faster the vehicle speed is, the greater the angle of rotation is, and the greater the deflection angle of the carriage is, the more easily the vehicle will roll over. 3) Both the safety valve and the gyroscope can provide effective torque to prevent rollover, which has very important guiding significance for the design of anti-rollover structure, optimization design and safety control of large trucks.

Keywords

Dongfeng Heavy Duty Truck, Rollover, Bernoulli Equation, Safety Valve, Gyroscope Principle

Copyright © 2021 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

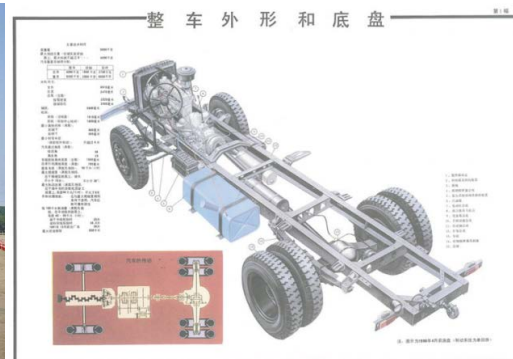
1. 引言

据中国政府网对 2020 年国民经济统计中, 全年货物运输总量达 463 亿吨, 货物运输周转量 196,618 亿吨公里, 其中公路运输总量为 342.6 亿吨, 总排名第一, 公路运输周转量为 60,171.8 亿吨公里, 总排名第二[1]。在这样的背景下, 我国对载货车的需求日益提升, 对载货车的整体性能也提出了更高的要求。以东风商用车为例, 如图 1 所示, 在每一辆车投放市场前都会经历众多极端严格测试[2], 比如: ABS 防抱死实验、正面碰撞和冲击试验的安全测试等等。

载货汽车(Truck)是一种主要为载运货物而设计和装备的商用车辆[3], 而随着汽车工业的不断发展, 货车行驶的安全性越来越多地受到关注。2020 年 9 月 15 日 11 时, 一辆运输蒜瓣的货车由于在转弯过程中车轮转角过大从而导致侧翻, 车上部分蒜瓣抛撒至路面和路边沟内, 该事故已造成 8 人死亡, 11 人受伤的惨重后果[4]; 2021 年 1 月 26 日下午, 一辆运输土豆的火车在行驶至围场境内大庙隧道处发生侧翻, 车上土豆撒落一地, 导致隧道被堵塞几个小时, 事后调查发现该货车超速行驶, 货物严重超载且偏向一方[5]。鉴于货车载物较多, 体积较大, 质心较高等特点, 以至于其倾斜稳定性比较差, 在转弯的过程中, 极容易出现翻车事故, 从而造成生命财产损失。研究如何提高车辆行驶稳定性, 减少侧翻事故是车辆行驶安全研究的热点。



(a) 东风重型载货车



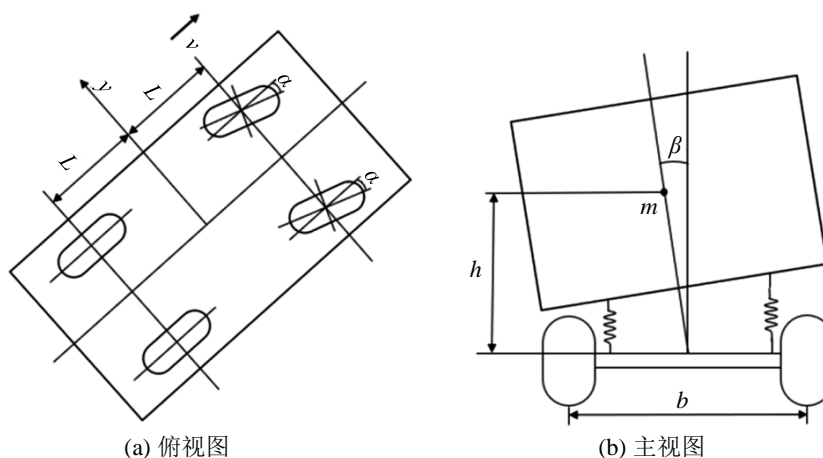
(b) 东风重型载货车结构图

Figure 1. Dongfeng heavy-duty truck [2]

图 1. 东风重型载货车[2]

2. 货车受力模型与解析

本文对货车在水平路面转弯时的受力情况进行分析, 由于货车普遍重心高, 质量大, 将货车车厢作为刚体, 重心在其几何中心, 为了方便分析, 假设仅有车厢能倾斜, 建立如图 2 所示的货车侧翻动力学模型。



(a) 俯视图 (b) 主视图
(a 为俯视图, b 为主视图, 其中 b 图两侧的“弹簧”仅代表车厢可以发生倾斜, 不参与运算)

Figure 2. Dynamic model of truck rollover
图 2. 货车侧翻动力学模型

货车在较高速度时转弯侧翻的主要原因是圆周运动所产生的离心力, 首先计算货车转弯产生的离心力, 可将图 2(a)俯视图所展示的运动轨迹进一步简化成理论力学的刚体运动, 如图 3 所示。

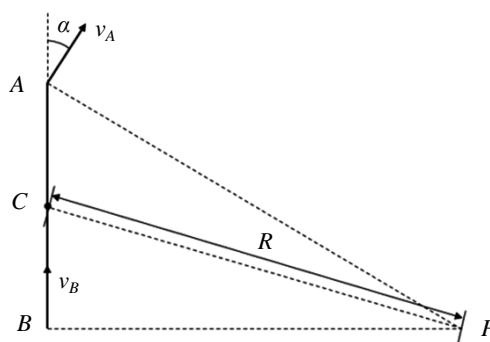


Figure 3. Simplified model of truck turning
图 3. 货车转弯简化模型

点 P 是货车运动的转动瞬心, 将车体质心的运动半径作为货车转弯时的运动半径, 可通过计算得到

$$R = \frac{L}{\tan \alpha} \sqrt{4 + \tan^2 \alpha} \quad (1)$$

则货车受到的离心力

$$F = \frac{mv^2}{R} = \frac{mv^2 \tan \alpha}{L\sqrt{4 + \tan^2 \alpha}} \quad (2)$$

式中： L ：前后轮子间距离的一半； α ：货车前轮的转动角度； m ：货车质量； v ：货车运动速度。

以东风重型载货车为例[6]，总质量为 31,000 kg，整车外形尺寸为 $12 \times 2.55 \times 3.97$ m，最高车速为 135 km/h。假设车以 108 km/h 的时速行驶，车轮转角小于 90° ，那么离心力与转动角度的关系可以通过进行绘图得到，如图 4 所示：

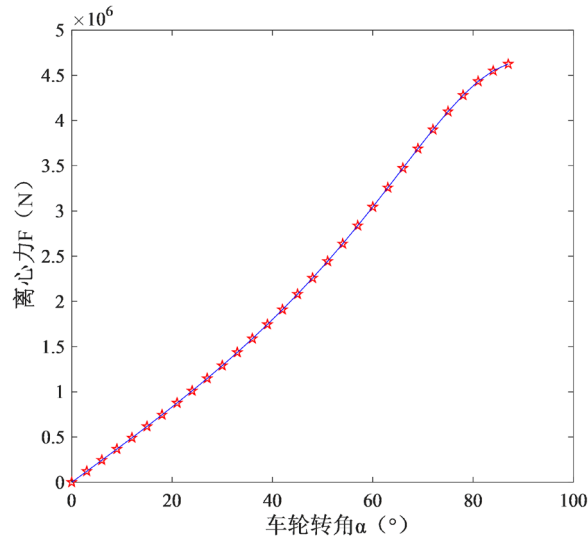


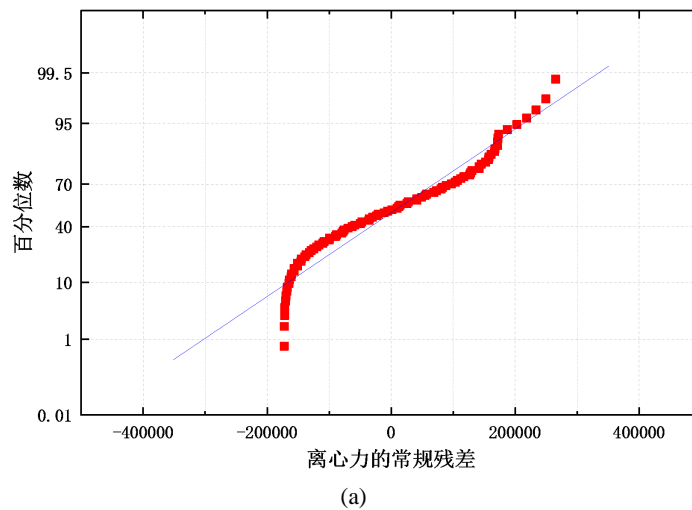
Figure 4. The relationship between centrifugal force and rotation angle
图 4. 离心力与转角的关系

分析可得到，当车轮转角为 $\alpha = 0^\circ$ 时，货车离心力 $F = 0$ N，这是与我们常识相符的。当车轮转角为 $\alpha = 24^\circ$ 时，货车离心力 $F = 1.010423 \times 10^6$ N；当车轮转角为 $\alpha = 44^\circ$ 时，货车离心力 $F = 2.021874 \times 10^6$ N。离心力 F 与车轮转角 α 近似为一元一次函数关系，经过函数拟合可得到：

$$F = 5.6245 \times 10^4 \times \alpha - 2.81063 \times 10^5 \tag{3}$$

其中 F 为货车离心力， α 为车轮转角。

拟合结果与如图 5 所示，拟合后 Pearson's r 系数为 0.99602， $R^2(\text{COD})$ 为 0.99205，这意味着拟合结果具有较高的可信度，因此可以通过此公式大致判断车辆在行驶转弯时离心力的大小。



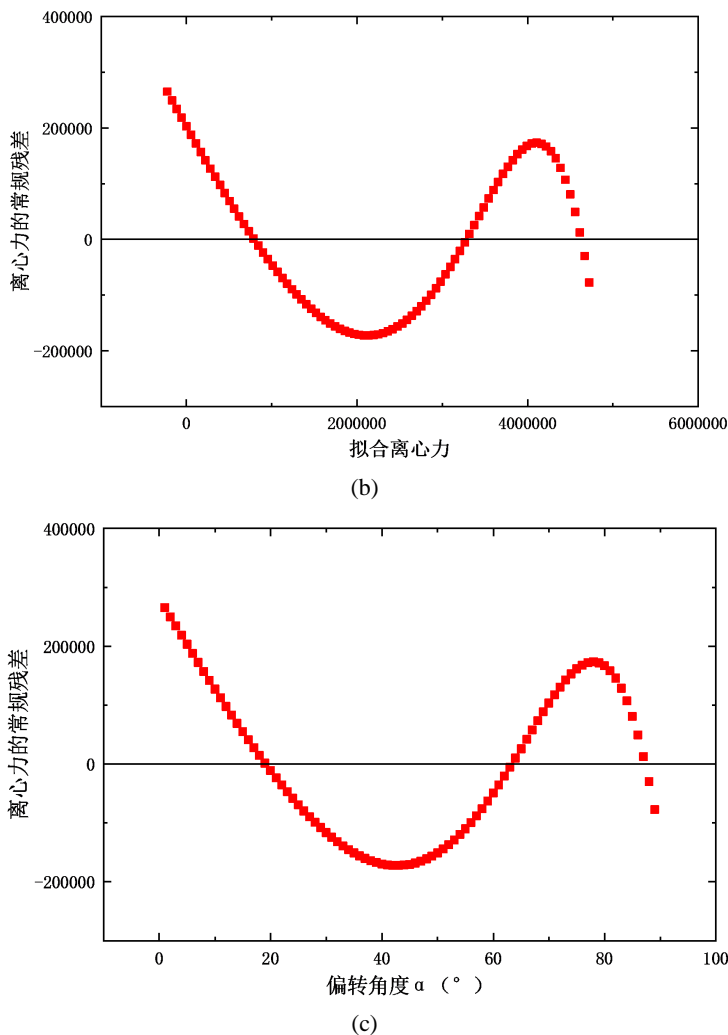


Figure 5. Fitting analysis. (a) The conventional variance relationship between percentile and centrifugal force; (b) The relationship between the conventional residual of centrifugal force and the fitted centrifugal force; (c) The relationship between the conventional residual of centrifugal force and the wheel angle

图 5. 拟合分析。(a) 百分位数和离心力的常规方差关系；(b) 离心力常规残差和拟合离心力的关系；(c) 离心力的常规残差和车轮转角的关系

接下来对货车进行受力分析，图 2(b)主视图受力也可进一步简化，如图 6 所示。

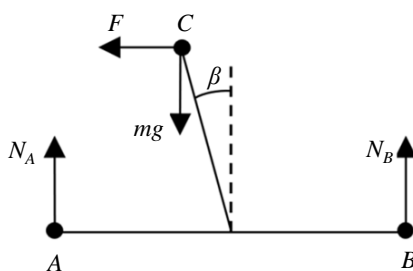


Figure 6. Simplified model of truck load

图 6. 货车受力简化模型

货车向右转弯时，通常是向左侧翻，因此对点 B 的支持力进行计算，当 B 点所受支持力 $N_B \leq 0$ 时，汽车将向左侧侧翻，对 A 点取矩

$$\sum M_A = 0 \tag{4}$$

$$Fh + N_B b - mg \left(\frac{b}{2} - h \tan \beta \right) = 0 \tag{5}$$

仍以东风重型载货车为例，侧翻前，货车车厢偏转角度小于 90° ，那么重力对 A 的矩与偏转角度的关系为

$$M_{mg \rightarrow A} = mg \left(\frac{b}{2} - h \tan \beta \right) \tag{6}$$

可以通过 MATLAB 绘图得到，如图 7 所示，进而对其求导可以得到力矩变化与角度变化的关系，如图 8 所示：

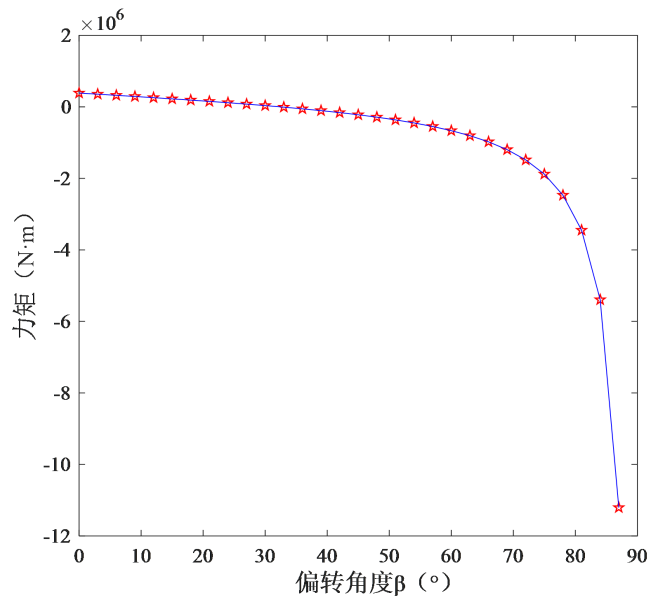


Figure 7. The relationship between the moment of gravity to A and the deflection angle

图 7. 重力对 A 的矩与偏转角度的关系

图 7 数据表明，车厢偏转角度为 $\beta = 0^\circ$ 时，重力对 A 的矩为 $M_A = 3.87345 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，随后随着偏转角度的增大，重力矩不断增大，当车厢偏转角度 $\beta \approx 32.5^\circ$ 时，重力对 A 的矩为 $M_A \approx 0 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，这意味着货车侧翻的可能性进一步提高。通过图 8 可以得到，当货车车厢偏转角度达到 30° 时，货车力矩变化量达 $\Delta M_1 = -1.4000 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$ ，随后力矩变化量越来越大，偏转角度达 72° 时，货车力矩变化量达 $\Delta M_2 = -1.05402 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$ 。

右侧车轮所受支持力与货车的速度关系为

$$N_B = mg \left(\frac{1}{2} - \frac{h}{b} \tan \beta \right) - \frac{mv^2 h \tan \alpha}{Lb\sqrt{4 + \tan^2 \alpha}} \tag{7}$$

式中： h ：货车重心距车轮轴的竖直距离； b ：左右车轮的距离； β ：车厢倾斜角度(由安装在车厢的传感器监测得到)。

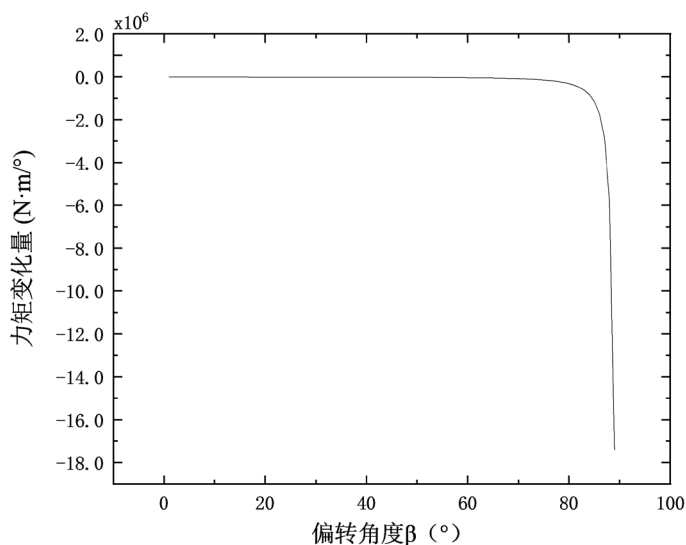


Figure 8. The relationship between the change in the moment of gravity and the deflection angle

图 8. 重力矩变化量与偏转角度的关系

以东风重型载货车为例，假设车以 108 km/h 的时速行驶，车轮转角小于 90° ，货车车厢偏转角度小于 90° ，那么 B 点的支持力与转动角度、偏转角度的关系可以通过 MATLAB 进行绘图得到，如图 9 所示：

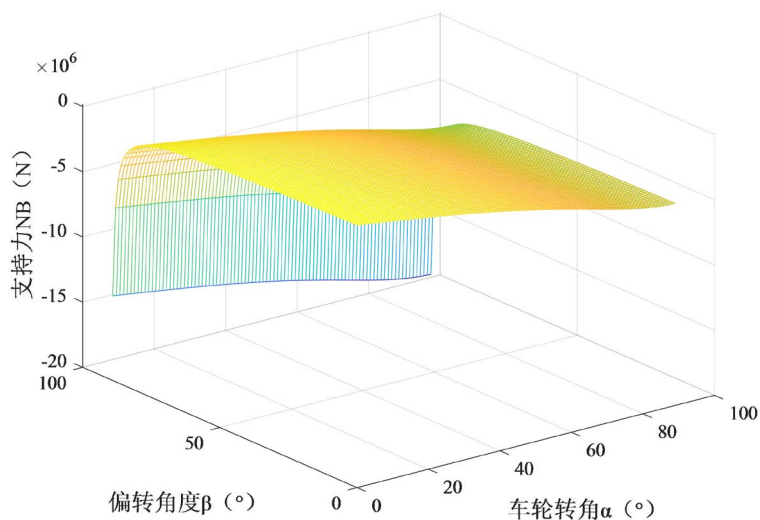


Figure 9. The relationship between supporting force and deflection angle and wheel rotation angle

图 9. 支持力与偏转角度、车轮转角的关系

根据推导的关系式可以看出，当货车车速过大、转角过大和重心过高时 N_B 都将趋向为负值，当货车在转弯时，转角越大支持力越小，当车速为 36 km/h 时，当车轮转角 $\alpha = 38.9612^\circ$ 时，其货车右侧车轮受地面支持力 $N_B = 0$ N，而当车速为 72 km/h 时，当车轮转角 $\alpha = 10.6614^\circ$ 时，支持力为 0 N，当货车在高速奔跑，假设车速为 108 km/h 时，当车轮转角 $\alpha = 4.7659^\circ$ ，支持力就已经为 0 N；当货车在笔直的道路上行驶时，如果货车车厢偏转角度 $\beta = 32.52^\circ$ ，此时货车右侧轮受地面支持力 $N_B = 0$ N，这意味着货车随时有侧翻的风险。

所以司机在转弯时适当减速、减缓转弯的角度或货车装货时尽量降低其重心的高度都可以避免货车发生侧翻，这与我们常识是相符的。

3. 货车防侧翻装置概念设计

防侧翻装置主要通过监视车辆行驶转弯角度、速度和车厢倾斜角度，自动计算出车轮所受支持力，当支持力小于设定的临界值 N_0 (即 $N_B \leq N_0$) 时，自动启动安全气阀和陀螺仪防侧翻装置，及时阻止车辆侧翻。

3.1. 安全气阀

在货车两侧上端安装与车身等长的喷气装置，内部充满高压气体，沿装置水平方向上等距布置喷气阀。当装置检测到侧翻危险时，开启对应方向的喷气阀，以单个喷气阀为例，分析产生的推力。

系统不考虑能量损失，由伯努利方程[7] [8] [9]得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \tag{8}$$

式中： z_1, z_2 : 喷气阀内外所处的高度； p_1, p_2 : 喷气阀内外的压强； v_1, v_2 : 喷气阀内外的速度。

又因为 $z_1 = z_2, p_1 = p, p_2 = 0, v_1 = 0, v_2 = v$ ，得：

$$v = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \tag{9}$$

喷射的推力可以表示为：

$$F_i = Q_m v + PA \tag{10}$$

式中： F_i : 喷射推力； Q_m : 质量流量； v : 喷射出口速度； P : 喷射出口压强； A : 喷气阀出口截面积。

等式右边第一项为动量推力，第二项为压差推力，采用相对压强。

示意图如图 10 所示，为保证货车不侧翻，推力的合力对图 6 中 A 点取矩：

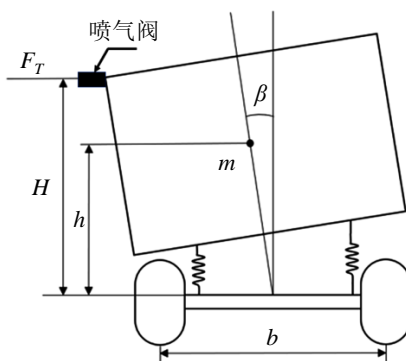


Figure 10. Schematic diagram of the position of the jet reaction force

图 10. 喷气反力位置示意

$$F_T = \sum F_i \tag{11}$$

$$M = F_T H \tag{12}$$

使其满足对 A 点取矩仍为 0，即：

$$Fh + N'_B b - mg \left(\frac{b}{2} - h \tan \beta \right) - F_T H = 0 \quad (13)$$

$$N_B = mg \left(\frac{1}{2} - \frac{h}{b} \tan \beta \right) - \frac{mv^2 h \tan \alpha}{Lb\sqrt{4 + \tan^2 \alpha}} + \frac{F_T H}{b} \quad (14)$$

由此可见, 当安全气阀工作时, 所产生的力矩能够有效的提高的点 B 的支持力, 从而防止货车发生侧翻。

3.2. 陀螺仪原理

在货车两侧也可以采用安装两个陀螺仪的方法, 通过陀螺仪[10] [11]启动后产生陀螺仪现象来控制实现货车的左右平衡, 这主要依据其产生的三个力学特性, 即定轴性、进动性和陀螺效应。当装置检测到侧翻危险时, 两侧陀螺仪迅速旋转, 从而开启两个方向的平衡, 使得货车开始发生动态平衡。陀螺仪安装如图 11 所示:

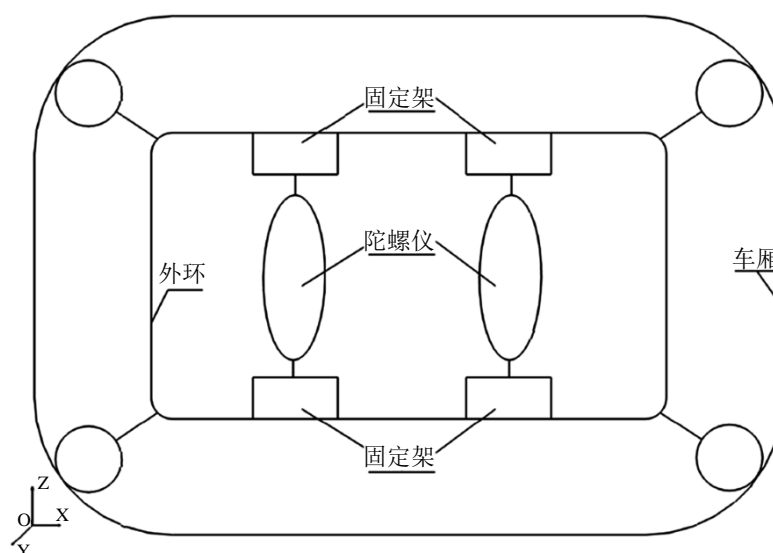


Figure 11. Schematic diagram of gyroscope installation
图 11. 陀螺仪安装示意图

从广义上来说, 一个刚体能绕一个轴进行旋转, 这个旋转轴又可以绕与其交汇的另一个轴旋转, 那么这个刚体就可以称之为陀螺。陀螺在受到外力矩的作用时会呈现三个特性: 定轴性、进动性和陀螺效应。接下来将利用这三个力学特性实现控制货车的左右平衡。

如图 12(a)所示为陀螺仪的示意图, 其中陀螺转子的自转速度为 ω 。

当对陀螺内环施加外力使得陀螺转子绕 y 轴以 $\dot{\theta}$ 的速度转动时, 陀螺会产生陀螺力矩 τ , 即

$$\tau = I_z \dot{\theta} \times \omega \quad (15)$$

式中: I_z : 陀螺转子自转方向的转动惯量; $\dot{\theta}$: 外力作用下陀螺内环角速度; ω : 陀螺转子自转的角速度。

陀螺力矩不同于一般的刚体反作用力矩, 其方向垂直于自转方向和外力矩作用的方向, 方向符合右手螺旋定则[10], 在图 12(b)中陀螺力矩 τ 方向为 x 轴。陀螺转子产生的陀螺力矩通过陀螺内环传递到陀螺外环, 再由外环作用在货车的身上以使货车实现左右方向的平衡。

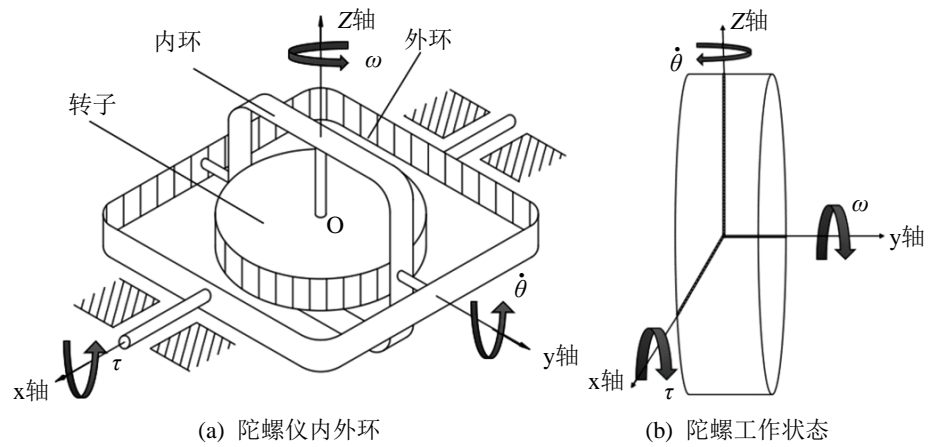


Figure 12. (a) Schematic diagram of the gyroscope; (b) Schematic diagram of the gyro rotor
图 12. (a) 陀螺仪示意图; (b) 陀螺转子示意图

图 13 为货车中的陀螺转子在外力矩作用之前，陀螺自身坐标系 X_b 轴与货车 x 轴方向相同；图 14 为陀螺转子在外力作用下绕内环旋转了 θ 角度之后，即 X_b 与 x 轴的夹角为 θ ，产生的陀螺力矩为 τ 。

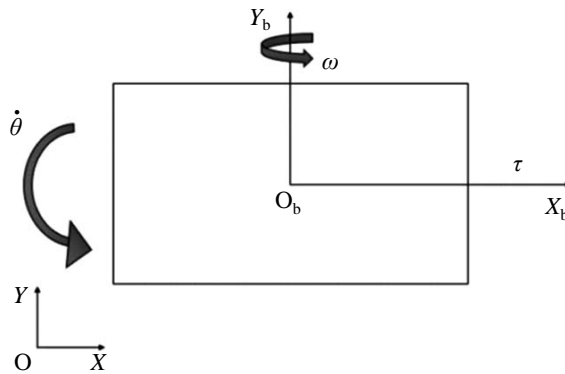


Figure 13. Schematic diagram of the rotation of the gyro rotor
图 13. 陀螺转子旋转示意图

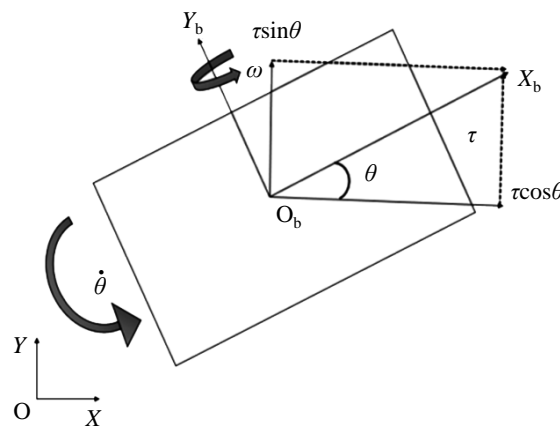


Figure 14. Schematic diagram of the rotation of the gyro rotor disturbed by external forces
图 14. 陀螺转子受外力干扰旋转示意图

陀螺力矩 τ 在货车坐标系 x 轴的分力矩为 $\tau \cos \theta$ ，在货车坐标系 y 轴的分力矩为 $\tau \sin \theta$ 。其中， x 轴的分力矩为控制货车左右平衡的实际力矩，而 y 轴的分力矩则会对货车的前后平衡产生干扰，增加货车的控制难度。因此可采用双陀螺前后竖直放置的结构，使得两个陀螺产生的 y 轴分力矩相互平衡抵消。

如图 15 的两个陀螺转子的自转速度 ω' 和 ω 大小相同方向相反，外力矩控制着陀螺旋转的转速 $\dot{\theta}'$ 和 $\dot{\theta}$ 大小相同方向相反。

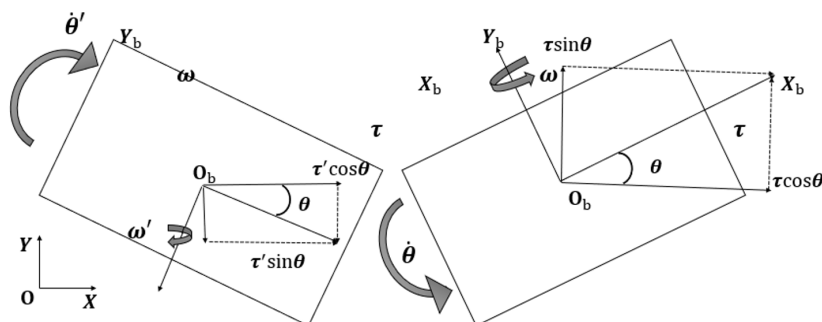


Figure 15. Torque offset diagram
图 15. 力矩抵消图

两个陀螺产生的 y 轴的分力矩 $\tau' \sin \theta$ 和 $\tau \sin \theta$ 相互抵消，产生的有效力矩方向相同，都沿着货车坐标系 x 轴，其和力矩大小为：

$$\tau_x = 2I\dot{\theta}\omega \sin \theta \quad (16)$$

根据这种结构以实现货车左右平衡，并且有效减少了 y 轴的分力矩的干扰，从而降低在控制车辆行进中的前后平衡和左右平衡的耦合性。

从以上公式可以观察到，陀螺产生的陀螺力矩和其转动惯量、外力矩控制的转速、自身转速和转过的角度有关。转动角度不宜过大即符合设计的陀螺转子机械结构，在实际控制中，往往需要通过额外的手段来控制外力矩以控制不同的陀螺内环的转动角速度，从而产生不同大小的有效力矩，用于汽车行驶中的左右动态平衡控制。

4. 结论

货车侧翻的原因是转弯时产生的离心力使货车所受力矩不平衡，理论分析得到了货车侧翻的三个主要因素分别是转弯角度、速度和货车的重心高度。研究发现：

1) 在货车车速恒定的条件下：① 在车厢不发生偏转时，离心力的大小与转弯角度近似成线性关系，拟合结果为： $F = 5.6245 \times 10^4 \times \alpha - 2.81063 \times 10^5$ ，可以通过此公式大致判断车辆在行驶转弯时离心力的大小。② 在车轮不发生偏转，车厢偏转角度 $\beta \approx 32.5^\circ$ 时，重力对 A 的矩为 $M_A \approx 0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，此时右侧车轮受地面支持力 $N_B \approx 0 \text{ N}$ ，这表明此时已经达到了货车侧翻的临界值。

2) 在货车行驶过程中，假设车厢相对于底盘不发生偏转，定义右侧车轮受到地面的支持力为 $N_B = 0 \text{ N}$ (即达到货车侧翻的临界条件)时，车速越快，则车轮转角越小。这意味着货车在行驶中如果车速较快，即便转角很小也可能会发生侧翻。

根据伯努利原理，在货车有侧翻风险时，可以通过喷出高压气体产生反力，削弱离心力的影响，让货车保持平衡，减少发生侧翻的危险；也可以根据力矩原理，通过设计一种陀螺仪来产生额外的力矩，从而削减其他力矩(其他力矩指的是使车辆侧翻的力矩)，以此保证货车不发生侧翻行为。本文对防侧翻措

施进行了理论层面的研究, 如果能将以上措施应用在实际车辆中, 一定能够有效较少侧翻的危险, 为交通安全保驾护航, 做出一份力量。

基金项目

国家自然科学基金(12072363)和中国矿业大学教学研究重点项目(2020ZD02)资助项目。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/shuju/2021-02/28/content_5589283.htm, 2021-08-11.
- [2] 东风商用车. 东风商用车技术中心简介[EB/OL]. <http://www.dfcv.com.cn/ModelPages/ProManufacture/AboutResearch.aspx>, 2021-08-11.
- [3] 载货汽车(卡车) [EB/OL]. 百度百科. <https://baike.baidu.com/item/%E5%8D%A1%E8%BD%A6/4339?fr=aladdin>, 2021-08-11.
- [4] 新京报. 河南货车侧翻致 8 名拾蒜者死亡[EB/OL]. <https://www.bjnews.com.cn/detail/160025680515022.html>, 2021-08-11.
- [5] 承德晚报. 装载土豆货车隧道内侧翻众人伸援手[EB/OL]. <http://epaper.hehechengde.cn/cdwb/news/3474/36098/187633-1.shtml>, 2021-08-11.
- [6] 东风商用车. 北京京投汽车贸易有限公司[EB/OL]. <https://www.china.cn/huochet/4656059506.html>, 2021-08-11.
- [7] 陈燕黎. 伯努利方程的原理及运用浅析[J]. 漯河职业技术学院学报, 2012, 11(2): 86-88.
- [8] 严导淦. 流体力学中的总流伯努利方程[J]. 物理与工程, 2014. 24(4): 47-53.
- [9] 郑永令. 流体流动状态与伯努利方程[J]. 大学物理, 1994, 13(8): 1-4.
- [10] 宋桂云. 陀螺仪的应用及发展[J]. 有色金属, 2002, 54(4): 108-110+133.
- [11] Zhang, X.Y., Liu, Q.J., Liu, J., *et al.* (2021) Using Gyro Stabilizer for Active Anti-Rollover Control of Articulated Wheeled Loader Vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, **235**, 237-248. <https://doi.org/10.1177/0959651820937114>