

小汽车能否“拯救”濒临落崖的重卡

王永康 田展 陈奎孚 常正

(中国农业大学理学院, 北京 100083)

摘要 涉及力量与技巧的视频广告对社会大众具有独特的吸引力,挖掘其中的科学原理和物理元素,既能促进科普、激发大众物理兴趣,也能有效丰富课堂教学。本文聚焦某品牌汽车营救濒临坠崖重型卡车的视频广告,通过对广告场景的物理力学建模,揭示汽车“以弱胜强”的关键并非广告宣称的动力性能,而是得益于广告场景中粗糙地面提供的较大摩擦力以及卡车空载导致的较小翻转力矩。该视频广告具有震撼性和趣味性,是优秀的科普素材。本文的相关分析综合应用了物理教学中多个重要知识点,富有启发性和知识性,可作为丰富课堂教学活动的典型案例推广使用。

关键词 力学模型;最大静摩擦力;力矩平衡;科普;教学案例

CAN A SMALL CAR SAVE A HEAVY TRUCK FALLING OFF A CLIFF

WANG Yongkang TIAN Zhan CHEN Kuifu CHANG Zheng

(College of Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract Video commercials with power and skill uniquely appeal to the general public. Exploiting the scientific principles and physical elements involved is a powerful tool for promoting science and stimulating the interest in physics, as well as effectively enriching teaching materials in class. This paper focuses on a commercial in which a small car shockingly rescues a heavy truck falling off a cliff. The physical and mechanical modeling is carried out according to the advertising scene. It reveals that the key to the “weakness conquers strength” is not the performance of the car, but the large friction provided by the rough ground and the small flipping moment due to the unloaded truck. This video advertisement is shocking and interesting, and is excellent popular science material. The relevant analyses in this paper involve the comprehensive application of essential knowledge in physics, which is enlightening and knowledgeable and can be used as a typical example to enrich classroom teaching activities.

Key words mechanical modeling; maximum static friction; balance of moment; popularization of science; teaching case

优秀的视频广告需要具有震撼性,通过创意、内容、运镜等各环节设计给消费者留下深刻印象。同时,视频广告也须具有真实性,客观、实际地体现产品的优点和特色。相比震撼性,广告的真实性不那么容易辨别,需要通过科学分析,来揭示其中的“玄虚”。值得关注的是,如果能够依托这类“吸引眼球”的视频广告开展科学研究,挖掘其中

的科学元素(或其违背某科学原理之处),必然能强化社会的深度思维、批判性思维习惯,促进整个社会的科学氛围,具有很大的受众面和受益面。

在某品牌汽车的视频广告^[1]中展现了如下场景:重型卡车缓慢倒车至悬崖边(图1(a)),待其濒临落崖时(图1(b)),一辆小汽车开足马力(图1

收稿日期: 2022-12-27

作者简介: 常正,男,副教授,主要从事力学研究与教学工作,研究方向为固体力学, changzh@cau.edu.cn。

引文格式: 王永康,田展,陈奎孚,等. 小汽车能否“拯救”濒临落崖的重卡[J]. 物理与工程, 2023, 33(3): 34-37.

Cite this article: WANG Y K, TIAN Z, CHEN K F, et al. Can a small car save a heavy truck falling off a cliff[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(3): 34-37. (in Chinese)

(c)),用绳索将重卡拉回崖边(图 1(d))。广告力求通过营救十倍于自身重量卡车的“壮举”展现产品(即:小汽车)优异的动力性能,震撼的场景也确实能让观众获此第一印象。然而,小汽车“以弱胜强”的秘诀是否归结为其动力性能,抑或还有其他关键原理与因素,需要通过详细合理的建模、分析与计算来探究。

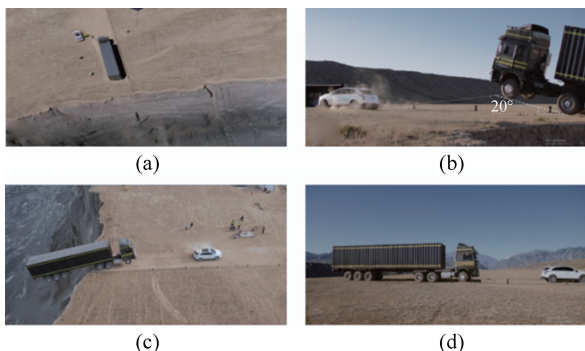


图 1 广告中的典型场景

(a) 重卡缓慢退至悬崖边($t=14\text{s}$, t 为影片时间); (b) 重卡部分悬空, 车身翻转 20° ($t=29\text{s}$); (c) 小汽车通过牵绳营救重卡($t=33\text{s}$); (d) 小汽车成功将重卡拉回崖边($t=57\text{s}$)

本文针对该广告场景进行了物理力学建模, 将汽车营救重卡这一复杂问题分解成两个经典力学问题进行分析, 揭示了汽车“以弱胜强”的原理。这一案例兼具震撼性和趣味性, 涉及物理力学知识的综合应用, 不仅是趣味科普素材, 也可作为优秀课堂教学案例推广使用。

1 模型的建立

选取汽车拉重卡的临界平衡状态(图 1(c))构建物理力学模型, 如图 2(a)所示。由于广告片中明确指出将重卡“车头与车厢连接处焊死”, 故问题中汽车(简称“A 车”)和重卡(简称“B 车”)均可视为刚体, 其中 A 车水平平动, B 车绕车轮做定轴转动, 两车通过一根牵绳连接。显然, 忽略绳索质量并将其视为不可伸长不会对分析造成显著影响。问题涉及的所有物理量及其取值由表 1 给出。其中大部分数据由广告片^[1]提供。对于影片中未提及的参数, 笔者通过查阅文献资料^[2-5], 进行了合理估计。数据中, 重卡各部分的重心位置由以车头最前端为原点的平面直角坐标系描述, 如图 2(b)所示。

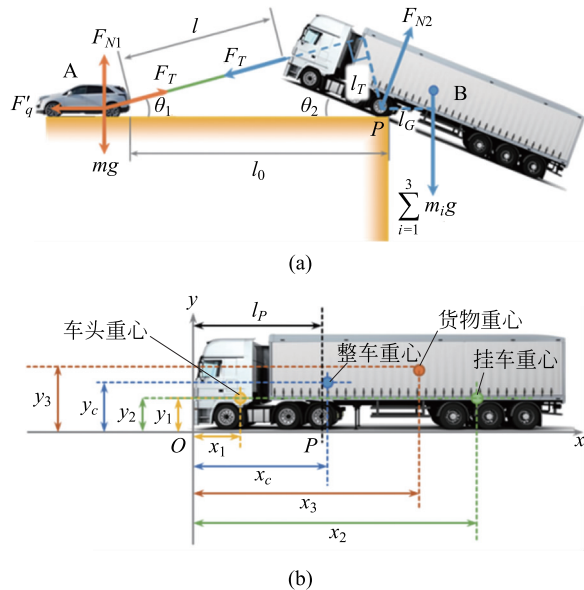


图 2 汽车重卡物理力学模型

(a) 问题的简化模型与受力分析; (b) 重卡整体及各主要部分的重心位置及相应的坐标系

2 问题的分析

2.1 系统受力分析

模型受力分析非常简单。如图 2(a)所示, A 车受自身重力 mg 、地面支持力 F_{N1} 、牵引力 F'_q 以及牵引绳拉力 F_T 的作用; 而 B 车在翻转一定角度 θ_2 后, 受到牵引绳拉力 F_T 、重力 $\sum_{i=1}^3 m_i g$ 以及地面约束力作用。

可见, A 车在水平方向上的受力为牵引力与绳拉力的博弈, 类似于“拔河问题”; 而 B 车受拉力、重力共同作用, 是典型的“杠杆问题”。下面将就两个问题分别进行讨论。

2.2 拔河问题——针对汽车的分析

分析 A 车牵引力^[6,7]时, 存在一个常见误区, 即用车辆驱动力作为其对绳索的牵引力。事实上, 汽车牵引力与驱动力并不等价, 而与摩擦力密切相关。这与拔河问题^[8]有异曲同工之意: 拔河时, 取胜的关键不在于队伍的力气, 而在于队伍的最大静摩擦力。真实的汽车牵引力是由地面所提供的, 恒等于汽车所受的摩擦力^[7]。因此, 模型中, A 车牵引力为摩擦系数与地面支持力的乘积, 即 $F'_q = \mu F_{N1}$ 。需要注意的是, 绳索与地面的夹角 θ_1 对牵引力的影响不容忽视。因此, A 车实际能提供的牵引力为

$$F'_q = \mu \cdot (n \cdot mg - F_T \sin \theta_1) \quad (1)$$

其中, n 为 A 车数量, 根据广告内容这里取 $n=1$ 。

表 1 问题涉及的物理量、取值以及数据来源^[1-5]

A 车相关参数					
参数名称	取值	数据来源	参数名称	取值	数据来源
质量 m	1.960t	[1]	变速箱齿比 i_a	4.96	[2]
实测牵引力	12.45kN	[1]	与地面摩擦系数 μ	0.7	[1]
最大扭矩 $T_t^{\max}$	350.0N·m	[1]	变速箱机械效率 η_T	86%	[4]
车轮半径 R	0.370m	[1]	与车轮 P 距离 l_0	14m	①
牵引绳长 l	10.60m	[1]	牵引绳倾角 θ_1	12°	②
主减速比 i_0	4.5	[3]			
B 车相关参数					
参数名称	取值	数据来源	参数名称	取值	数据来源
整车质量 M	21.110t	[1]	车头与车轮 P 距离 l_P	5m	①
最大倾角(空载)	20°	[1]	车头重心 (x_1, y_1)	(2m, 0.4m)	④
车头质量 m_1	10.555t	③	挂车重心 (x_2, y_2)	(8m, 0.4m)	④
挂车质量 m_2	10.555t	③	货物重心 (x_3, y_3)	(8m, 2m)	④
货重 m_3 (空载)	0	—	整车重心 (x_c, y_c) (空载)	(5m, 0.4m)	见 2.4 节
货重 m_3 (满载)	24.890t	③	整车重心 (x_c, y_c) (空载)	(6.62m, 1.27m)	见 2.4 节
最大倾角(满载)	18.4°	①			

注:①结合车身尺寸及图 1(d)等比例估计;②结合绳长和连接位置等信息估算;③结合文献[5]中重卡限载及车头、挂车质量相当推测;④结合 B 车各组成部分的结构、长度、质量分布及轮胎大小推测。

该问题中整个系统达到临界平衡所需 A 车牵引力为

$$F_q = F_T \cos \theta_1 \quad (2)$$

可见,需要进一步对 B 车进行分析,得到牵绳拉力 F_T 的临界值。

2.3 杠杆问题——针对重卡的分析

如图 2(a)所示,B 车在倾角为 θ_2 时满足铰点 P 处的力矩平衡^[9,10],即

$$\left(\sum_{i=1}^3 m_i g\right) \cdot l_G = F_T l_T \quad (3)$$

其中重力加速度取 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。由此得到 B 车临界平衡所需的拉力为

$$F_T = \left(\sum_{i=1}^3 m_i g\right) \cdot l_G / l_T \quad (4)$$

其中

$$l_T = l_0 \sin \theta_1 \quad (5)$$

可见, F_T 与重力 $\sum_{i=1}^3 m_i g$ 和重力臂 l_G 成正比,而这两个参数又由 B 车的承载情况决定。其中, B 车整体重心位置 (x_c, y_c) 可以通过如下公式求得

$$\begin{aligned} x_c &= \sum_{i=1}^3 m_i x_i / \sum_{i=1}^3 m_i \\ y_c &= \sum_{i=1}^3 m_i y_i / \sum_{i=1}^3 m_i \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $i = 1, 2, 3$ 分别表示车头、挂车和货物, (x_i, y_i) 和 m_i 分别为各部分的重心坐标以及质量,如图 2(b)所示。在此基础上,结合图 2(a),可以通过几何关系得到重力臂的表达式

$$l_G = y_c \sin \theta_2 + (x_c - l_P) \cos \theta_2 \quad (7)$$

2.4 结果分析与讨论

将表 1 中的相关数据代入式(6),可计算空载时 B 车重心位置为 $(x_c, y_c) = (5\text{m}, 0.4\text{m})$ 。同时,利用式(7)可得 $l_G \approx 0.1368\text{m}$ 。在此基础上,联立式(2)、(4)和式(5),可得到营救 B 车所需汽车牵引力为 $F_q = 9.510\text{kN}$,联立式(1)、(4)和式(5),可得 A 车能提供的牵引力为 $F'_q = 12.031\text{kN} > F_q$ 。这一结果是合理的,与广告中提供的实测牵引力仅存在 3.4% 的误差。该结果也表明 A 车能够成功营救空载的 B 车。

利用汽车扭矩 T_t 与驱动力 F_t 的关系

$$T_t = \frac{R}{i_a \cdot i_0 \cdot \eta_T} \cdot F_t \quad (8)$$

可知营救过程中 A 车实际提供的扭矩为 $T_t = 245.26\text{N} \cdot \text{m}$,仅为其最大扭矩的 70.1%。此时,即使 A 车提供更大的扭矩,也不会产生更大的牵引力,而是会使轮胎“打滑”。由此可见,该广告并不能完全体现汽车发动机的优秀性能。

满载时, B车质量为空载时的 2.18 倍。此时 B 车重心位置变为 $(x_c, y_c) = (6.62\text{m}, 1.27\text{m})$, 与空载情况相比, 向车尾方向发生了较大偏移。这将进一步导致重力臂 $l_G \approx 1.9381\text{m}$, 为空载时的 14.17 倍。由式(4)可知, 阻止满载重卡翻转所需的临界拉力为空载时的 30.9 倍。联立式(1)、(2)、(4)和式(5), 可得此时营救 B 车所需 A 车数量至少为 $n \approx 26$ 辆。若广告采用一辆 A 车去营救满载重卡, 显然会失败。可见, 重卡空载导致重心靠近转动轴, 使得造成重卡翻转的重力矩足够小, 是广告中汽车成功营救的必要要素之一。

3 结语

上述分析表明, 广告通过巧妙的场景设计实现了汽车“以弱胜强”的震撼表现, 但这样的一幕并不能展现产品的动力性能。汽车成功的秘诀, 一方面在于其足够重, 地面足够粗糙, 使得地面能够在汽车动力冗余的情况下提供尽可能大的最大静摩擦力; 另一方面在于重卡足够轻(空载), 重心足够靠近转轴, 使造成重卡翻转的重力矩足够小。此外, 对重卡满载情况的分析不仅从另一侧面反映了上述论断, 也告诉我们在生活中不要贸然“以小博大”, 用小汽车去营救重型车辆。有必要指出, 广告中为了简化问题, 将车头和挂车两部分焊接成一体, 但在更接近生活实际的情况(鞍座不焊死)下, 重卡的运动和受力将变得更为复杂, 还涉及连接处的强度问题, 值得进一步研究。

“科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼, 要把科学普及放在与科技创新同等重要的位置。”习近平总书记为新时代创新发展作出如是指示。本案例既贴近生活, 具有趣味性和话题性, 又有广告设计带来的创造性和震撼性, 能够充分调动大众的好奇心和求知欲。分析过程深入浅出, 合理利用了物理、力学等知识工具, 揭开“视觉震撼”的神秘面纱并凸显其科学本质, 有利于帮助大众去伪存真, 养成良好的逻辑思维惯性。总而言之, 案例兼具科学性、思想性、普及性、艺术性和知识性, 是良好的科普素材。同时, 案例还是良好的物理课程教学素材。案例既需要常规车辆知识, 又涵盖“拔河问题”和“杠杆问题”两个基础物理学问题, 涉及摩擦力计算、重心计算力系平衡等重要知识点。问题难度适中且极具代表性, 既能开拓学生知识面, 又能锻炼其综合运用所学知识, 合

理简化问题、准确分析问题、有效解决问题的能力。对于视频广告中未给出的参数, 需要学生进行深入的调研或进行合理的估计, 充分锻炼其文献检索、知识收集的能力。案例中涉及参数众多, 仍具有很大的设计空间。教学中, 可让学生进行“角色扮演”, 作为广告案例的技术顾问, 在现有的基础上进行合理改进(如给汽车增加配重)或重新设计, 提出能够完全体现汽车优秀性能且不失宣传效果的广告设计方案。相关练习有利于引发学生对生活中物理力学问题的发掘与探索, 培养理性分析、辩证求真的思维习惯和思维能力, 使其科学敏感度得到有效锻炼。

参 考 文 献

- [1] 贾阿宝. 凯迪拉克 XT5 悬崖救援 Final copy[EB/OL]. (2022-08-23)[2022-12-27]. https://www.xinpianchang.com/a12082216?from=search_post.
- [2] 范鑫. 向 9AT 时代迈进: 揭秘 ZF 9 速自动变速箱[EB/OL]. (2012-10-26)[2022-12-27]. <https://www.autohome.com.cn/tech/201210/414125.html>.
- [3] 中华网汽车, 主减速比怎么确定?[EB/OL]. (2021-04-28)[2022-12-27]. <https://auto.china.com/mip/371654.html>.
- [4] 益欧迪艾科技(长春)有限公司, MT、DCT、AT、CVT 变速箱传动效率对比[EB/OL]. (2021-05-16)[2022-12-27]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/372664806>.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值: GB 1589—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [6] 陈国杰, 陈奎, 谢嘉宁, 等. 汽车牵引力的物理图像与本质探讨[J]. 物理教师, 2017, (7): 70-72.
CHEN G J, CHEN K, XIE J N, et al. Physical image and nature of automobile traction[J]. Physics Teacher, 2017, (7): 70-72. (in Chinese)
- [7] 陈驹. 怎样理解汽车的“牵引力”和“牵引力做功”[J]. 物理教师, 2013, (2): 53-54.
CHEN J. How to understand the “tractive force” and “tractive work” of cars[J]. Physics Teacher, 2013, (2): 53-54. (in Chinese)
- [8] 胡扬洋. 拔河比赛问题的物理因果与胜负因果[J]. 物理教师, 2015, (1): 9-11.
HU Y Y. Physical causality and outcome causality in tug-of-war problems[J]. Physics Teacher, 2015, (1): 9-11. (in Chinese)
- [9] 罗智. 浅议自行车上的杠杆原理[J]. 中国高新区, 2017, (15): 148.
LUO Z. Brief discussion on the principle of bicycle's lever[J]. Science & Technology Industry Parks, 2017, (15): 148. (in Chinese)
- [10] 陈奎孚. 理论力学精细辅导[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.