



无人驾驶技术

决策指南

内容摘要

James M. Anderson、Nidhi Kalra、Karlyn D. Stanley、Paul Sorensen、
Constantine Samaras、Oluwatobi A. Oluwatola 等人合著

This is a Chinese translation (simplified characters) of the summary of *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*.

有关本出版物的更多信息，请查询 www.rand.org/t/RR443-2

也可访问兰德公司的中文网站：www.rand.org/zh-hans.html

兰德公司出版，加州圣莫尼卡
版权所有 © 2016 兰德公司
RAND® 是兰德公司的注册商标。

有限的平面和电子媒体发行权

本文件和文中所含商标受法律保护。本作品的知识产权归兰德公司所有，不得用于商业用途。未经授权，严禁在网络上发布本作品。本文件仅允许个人复制使用，但不得擅自修改和删节。未经许可，不得复制或以其他方式将兰德公司的任何研究文献用于商业用途。有关翻印和链接授权的信息，请查询 www.rand.org/pubs/permissions。

兰德公司是一家解决公共政策挑战的研究机构，旨在协助推进全球社区的安全、卫生与繁荣事业。兰德公司致力于公共利益，属于非营利性、无党派组织。

兰德公司的出版物未必代表其研究客户和赞助商的观点。

赞助兰德公司

欢迎通过下列网址提供可免税的慈善捐赠

www.rand.org/giving/contribute

www.rand.org

内容摘要

无人驾驶技术有可能从根本上改变交通方式。配备这种技术的轿车和轻型汽车或将减少车祸的发生、能源消耗、以及污染，并降低交通拥堵的成本。

采用美国国家公路交通安全管理局 (NHTSA) 提出的五级系统，最容易将这种技术概念化。各级别的自动化实现了不同的技术效益：

- **0级：**人类驾驶员完全控制汽车的所有功能。
- **1级：**某一项功能是自动化的。
- **2级：**有多个功能同时实现自动化（如转向和加速），但驾驶员必须保持关注。
- **3级：**驾驶功能充分自动化，驾驶员可以安全地从事其他活动。
- **4级：**汽车可以自动驾驶，无需人类驾驶员介入。

人们必须谨慎决策，才可以最大限度地发挥这项技术的社会效益，同时尽可能克服相关的缺点。然而，政策制定者才刚刚开始思考该技术带来的挑战与机遇。本报告旨在协助各州及联邦层面的决策者对这个快速发展的领域做出明智决策。

无人驾驶技术的前途和风险

无人驾驶技术可能会对安全、交通拥堵、能源利用、乃至土地使用等产生重大影响。

传统驾驶不仅让司机承担成本（如燃料、折旧、保险），也给他人带来大量的外部成本，即“负外部性”。例如，每增加一名司机就加剧了所有其他司机面对的拥堵程度，也提高了另一名司机的事故发生机率。这种外部性的成本大约为每英里 13 美分。假设一名司机行驶了 1 万英里，除自己承担的那部分费用以外，还会给别人带来 1,300 美元的成本。无人驾驶技术有可能大幅降低司机承担的成本以及这种负外部性，具体如下所述。

对车祸的影响

虽然美国的车祸发生频率已经在逐渐下降，但这类事故仍然是一个较大的公共健康问题。2011 年，美国发生了 530 万起车祸，造成超过 220 万人受伤，3.2 万人死亡，以及数十亿美元的个人和社会成本。全球范围来看，这一数字要高得多。

无人驾驶技术可以显著降低交通事故的发生频率。据美国公路安全保险协会（IIHS）估计，如果所有车辆都安装前向碰撞和车道偏离警告系统、侧向（盲区）辅助和自适应前大灯，可以避免近三分之一的车祸和死亡人数（美国公路安全保险协会，2010 年）。汽车检测到障碍物时自动制动，这一功能也可以显著减少追尾事故的数量。汽车无人驾驶技术（4 级）有可能进一步减少事故的数量，因为司机自身犯错是造成大多数车祸的原因。作为佐证，在 2011 年，39% 的车祸死亡事故中有司机涉嫌酒驾。降低车祸发生频率的整体社会效益巨大，对美国 and 全世界都一样，而且许多效益将惠及其他无人驾驶汽车的买家。

对机动性的影响

对于那些目前不能驾驶或不愿驾驶的人，无人驾驶技术也促进了他们的机动性。4级无人驾驶技术（无需人类驾驶员介入），可以让盲人、残疾人或未达到驾驶年龄的年轻人用上自己的交通工具。这些群体由此享受诸多好处，包括提高独立性、减少社会隔离、以及获得必要的公共服务。目前，其中一些服务由公共交通或辅助客运系统机构提供，但这两种方式都有明显的劣势。公共交通通常设有固定的路线，未必经过某些生活和工作场所。辅助客运系统的成本高昂，因为需要训练有素的人类驾驶员，而这些驾驶员要开销人工。这些费用一般由纳税人承担，所以，以成本较低的无人驾驶车辆代替辅助客运系统有可能改善社会福利。

对交通拥堵及其成本的影响

3级或更高等级的无人驾驶技术有可能大幅降低交通拥堵成本，因为乘客可以在行驶途中从事其他活动。交通拥堵成本下降，将令无人驾驶车辆的个体用户受益。另一方面，交通拥堵减少或增加本身就具有外部效应，这会影晌所有的道路使用者。驾驶成本降低可能导致总车辆行驶里程（VMT）增加，进而可能加剧实际的交通拥堵情况。但因为车辆运行效率提高了，车祸引发的延误也减少了，这种技术还可以增加道路的吞吐量。因此，无人驾驶技术对交通堵塞的整体影响尚不确定。

土地使用

如上所述，3级或更高等级的无人驾驶技术有可能降低待在汽车上的时间成本，因为驾驶员被解放了，可以从事其他活动。另一方面，通勤者或更愿意选择到离家较远的地方工作，这可能导致人们远离市中心。正如汽车的兴起导致近郊和远郊的出现，启用无人驾驶汽车可能导致大都市周边的土地使用模式更加分散和低密度化。

然而，在大都市地区，由于就近停车的需求减少，密度可能会相应地增加。根据最近的一项研究估算，在 41 个主要城市的中央商务区，大约 31% 的空间被用于停车（Shoup, 2005 年）。4 级无人驾驶汽车可以在乘客离开后，自行开到边缘停车场。另一方面，无人驾驶汽车共享计划或将降低汽车保有率。无论哪一种情况，都可以减少停车位，让城市获得更大的发展空间。

在发展中国家，无人驾驶技术可能对土地使用产生不同的影响。当前汽车基础设施薄弱的国家可以“跃进”推广无人驾驶技术。正如移动电话让发展中国家跳过了昂贵的固网基础设施建设过程，无人驾驶技术或可帮助一些国家跨越某些传统的、以人类驾驶员为导向的出行基础设施建设。

对能源和排放的影响

无人驾驶技术对能源利用和污染的整体影响尚不确定，但似乎很可能同时减少能源使用和污染排放。

首先，无人驾驶技术可以让汽车的加速和减速比人类驾驶员操作更加平顺，从而使燃料经济性提高 4% 到 10%。通过减少车辆间距，增加道路容量等方式，燃料经济性或将得到进一步改善。一队紧密停靠的无人驾驶汽车就像一列火车，停止或减速的频率下降，从而降低最快速度（提高燃油经济性），提高有效速度（缩短出行时间）。随着时间的推移，车祸发生频率会降低，汽车和卡车可以轻型化。这将进一步提高燃料经济性。

无人驾驶汽车可以使用替代燃料，从而减少污染。如果车祸发生频率降低使得车辆轻型化，因行驶距离问题导致电动车和其他替代车辆的应用受局限的情况将不复存在。应用 4 级无人驾驶技术的汽车，不必人类驾驶员介入，汽车可以将乘客送达目的地后，自行前去充电或加油。以电力或燃料电池驱动的汽车有一个缺点，即缺乏补充燃料 / 充电的基础设施。4 级无

人驾驶汽车能够自动驾驶和自行补充燃料，这样一来，就可以减少建设很多燃料补给站。

另一方面，驾驶成本降低、汽车用户人群扩大（例如，老年人、残疾人、以及不满 16 岁的年轻人）可能会导致总车辆行驶里程增加。虽然与总车辆行驶里程的增加相比，燃料消耗和污染排放的减少更为重要，但结果究竟如何，尚不确定。

成本

虽然无人驾驶技术有诸多潜在的实质性效益，但随之而来的成本也很突出。讽刺的是，无人驾驶技术的许多成本一定程度上是伴随相关效益发生的。

例如，由于无人驾驶技术有可能减少交通拥堵成本，提高燃料经济性，特定用户的个人驾驶成本也随之下降。正因如此，加上无人驾驶汽车提高了老年人和残疾人的机动性，无人驾驶技术可能会增加总车辆行驶里程，反而导致驾驶的负外部性上升，包括交通拥堵加剧以及总体燃料消耗增加。

无人驾驶技术也可能打破现有的交通运输机制。由于不必就近停车，4 级无人驾驶技术可能导致停车收益减少，而停车收益是许多城市重要的、可靠的收入来源。一些用户通过无人驾驶汽车改善机动性的同时，可能对公共交通系统的乘客（及政策扶持）产生虹吸效应。目前，公共交通的一个主要吸引力在于乘客可以在途中从事其他事务。无人驾驶技术一旦推广，这种比较优势将荡然无存。

此外，一旦不需要司机，很多人会失业。出租车、卡车和公共汽车的司机可能会失去他们的生计和职业。如果车祸发生频率下降，保险公司、汽车修理厂、脊医等部门的“车祸经济”生态链将被打破。

总体而言，我们认为无人驾驶技术的效益——减少车祸、提高机动性、改善燃料经济性，超过其潜在的缺点和成本。不过，进一步的研究有助于准确估计这些成本和效益，以及相关

成本和效益能否归属于无人驾驶汽车的个体用户或公众。此类研究也有助于确定最优的补贴和税收政策，以便调节这项技术的私人成本和公共成本与效益。

当前的州立法律

美国的内华达州、佛罗里达州、密歇根州、加利福尼亚州以及华盛顿地区，已经通过各种立法来规范无人驾驶技术的使用。其他一些州也有相应的立法提案。

上述做法的缺点是，相互矛盾的监管要求必须进行补正。由于无人驾驶汽车尚未投入商用，迄今为止也没有报道在公路上使用这种技术有何问题，上述立法措施是否必要，不得而知。另一方面，这些提案开启了立法机构、公众、以及州监管部门之间关于即将到来的重大交通变革的对话。

无人驾驶汽车的简史与现状

几十年来，未来学家一直设想汽车能够自动驾驶，无人驾驶技术的研究可以分为三个阶段。

大约从 1980 年到 2003 年，大学研究中心致力于两大汽车自动化愿景。首先是自动化公路系统，相对“笨拙”的汽车依靠公路基础设施来引导。其次，另一些团体则致力于研究无需特殊道路的无人驾驶汽车。

2003 年至 2007 年，美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 面临的“三大挑战”，明显推动了无人驾驶技术的进步。前两个挑战在农村环境，第三个挑战在城市环境。每个挑战都促使大学研究团队开发此项技术。

最近，私营企业也推动了无人驾驶技术的发展。谷歌的无人驾驶汽车计划已经开发和测试了一队汽车，并通过举办活动来展示这项技术的应用——例如，有视频强调无人驾驶技术给盲人带来机动性（谷歌，2012年）。2013年，奥迪和丰田在国际消费电子展上公布了各自的无人驾驶汽车愿景和研究项目，国际消费电子展是每年一月份在拉斯维加斯举办的年度盛会（Hsu，2013年）。最近，日产也宣布计划到2020年开始销售无人驾驶汽车。

技术现状

谷歌的无人驾驶汽车已经试行驶 50 多万英里，没有发生过一次归因于自动驾驶的事故。先进的传感器可以收集环境信息，日益精密的算法可以处理传感器数据和控制汽车，加上强大的计算能力可以实现实时运行，正是这些因素促进了无人驾驶技术的发展。

一般来说，机器人系统（包括无人驾驶汽车）采用“感测—计划—行动”这样一种设计程序。为了感测环境，无人驾驶汽车使用传感器组合，包括激光雷达（用于光探测和测距）、雷达、摄像机、超声波和红外线。一组传感器组合可以互相补充，弥补任何一种传感器的弱点。虽然机器人系统非常擅长收集环境数据，但解读这些数据可能仍是极稳定无人驾驶汽车的开发过程中最困难的环节。

定位方面，车辆可以结合使用全球定位系统 (GPS) 和惯性导航系统 (INS)。不过，挑战仍然存在，因为这些系统在一定条件下可能有些失准。例如，惯性导航系统在 10 秒时间内可能出现高达一米的误差。在这一点上，尚不清楚哪种传感器组合可以做到最佳的性价比——特别是对于 3 级或更高等级的无人驾驶汽车。

为了实现真正的自动驾驶，无需后备司机随时应付紧急情况，无人驾驶技术需要适当地降级，以免发生车祸。例如，如

果自动驾驶系统的某些元件在拥挤的路况下拐弯操作失灵，则必须有一套足够稳当的后备系统，即使在这种情形下也能确保汽车安全地停下来。要达到这样级别的可靠性，可是挑战重重。

车对车 (V2V) 通信和车对交通设施通信 (V2I) 对无人驾驶操作的作用尚不明确。虽然这种技术可以在许多情况下减轻自动驾驶的任务，但还不清楚是否有此必要。此外，要实现车对交通设施通信，可能需要大量的基础设施投资，比如，是否每个交通信号灯都必须配备与汽车通信的无线电装置。

部分由于上述各种挑战，利益攸关方大都（但非全部）预计首批商用无人驾驶汽车会实践“共享驾驶”概念：汽车在某些运行条件下可以自动驾驶——譬如，低于特定速度，只在某些类型的道路上，在某些驾驶条件下——超出这些界限或人类驾驶员介入时，将恢复到传统的手动驾驶。

人类驾驶员重新介入，会带来另一个关键的挑战。为了体验无人驾驶技术的最大效益，人类驾驶员需要在汽车自动驾驶过程中从事其他活动。然而，为了安全起见，必要时需要人类驾驶员迅速（在短短几秒的时间内）接管汽车。认知科学研究显示，分心驾驶本身就是一项重大的安全挑战。同样，对一种公众广泛使用的技术来说，开发适合人机协作的心理模型可能也是一项挑战。

软件升级工作也充满挑战，因为可能需要向后兼容早期的汽车型号和传感器系统。此外，随着更多的车型具备自动驾驶功能，日益多样化的平台必须升级软件和其他系统，这对可靠性和质量保证提出更大的挑战。系统安全也是一个问题，故需要防止病毒或恶意软件破坏汽车系统的正常运行。

州政府交通主管部门要做好各种不同类型的无人驾驶汽车涌上路面的准备。这可能给车辆运营所必需的登记和规范带来

挑战，而且必须向特定用户提供一定程度的培训。一项可提高安全性的短期措施，是要求更严格地遵守道路标示，特别是那些关于道路施工或改造的标示。如此一来，既可以辅助人类驾驶员，又可以缓解对无人驾驶汽车的认知要求。

车载资讯系统和通信的作用

在无人驾驶汽车的开发过程中，非常重要的一个环节是围绕行驶中的汽车收发数据。首先，汽车可使用云端资源。例如，无人驾驶汽车可以使用基于其他车辆的传感器数据持续更新的“地图”。同样，如果某辆汽车的传感器发生故障，它可以在一定程度上依赖另一辆车的传感器。其次，联邦政府已支持专用短程通信 (DSRC) 应用程序的开发，该应用程序可以实现车对车通信和车对交通设施通信，并专门预留了电磁频谱。第三，我们调研的利益攸关方几乎都注意到不可避免的软件更新需求，这将需要某种形式的通信。最后，许多利益攸关方认为，当不再需要全时驾驶时，日趋精细化的“信息娱乐”内容可能会占用车上乘客的时间，而这些内容可能会提升无人驾驶技术的需求。

目前的政策焦点是专用短程通信的前景。虽然早在 2004 年就已经颁发专用短程通信许可，但仅限于实验和示范项目使用。最近，联邦通信委员会 (FCC) 在规章制订通知中宣布，正考虑允许未经许可的设备共享分配给专用短程通信的频谱，但仅限于与交通运输无关的用途。许多受访的利益攸关方表示，尽管在目前分配给专用短程通信的频谱使用不够充分，但此举可能会妨碍无人驾驶汽车的发展。

其他通信政策问题包括：需要修订关于分心驾驶的立法，

并协调车载通信平台的发展标准与数据安全、数据所有权和隐私等相关问题。

标准和规范

政府规范和工程标准是解决安全、健康、环境等公共问题的政策工具。规范是政策制定者颁布的强制性要求，由法律加以规定、政府负责执行。相比之下，标准是技术协会制定的工程准则，对产品的设计或性能提出明确要求。

标准和规范将在无人驾驶技术的产生与发展中发挥重要作用。

国家公路交通安全管理局是联邦政府主要的安全监管机构，通过颁布联邦机动车辆安全标准 (FMVSS) 来规定各种安全部件的性能标准，譬如特定的碰撞试验性能。国家公路交通安全管理局也有权发出召回令，并通过其新车评价规程影响市场。然而，该局对汽车的运营、车主的行为、车辆的维护、修理或改装没有管辖权。

自愿性标准也可能扮演重要角色，特别是在安全标准化、确保系统兼容性、以及通过车辆标准化运行化解一些复杂的人机交互问题等方面。

无人驾驶技术的责任问题

现有的责任制度似乎没有对应用无人驾驶技术的汽车车主或司机给予格外关注。相反，因为这些技术有望减少车祸数量、降低相关的保险成本，司机和汽车保险公司乐于采纳。

相比之下，制造商的产品责任可能会增加，导致无人驾驶技术的应用被无谓地拖延。根据几种归责理论，制造商或被追

究责任。警告和消费者教育在管理相关系统的制造商责任方面至关重要，但是，各方面的忧虑仍然会让引进这项技术的脚步放慢，即使是符合社会需求的。

一种潜在的解决方案是综合考虑各方利益，将成本效益分析充分纳入责任标准。不过，难以确定该考虑哪些适合的成本和效益因素，后续研究将大有裨益。

制造商可以通过改变汽车制造业的经营模式来降低相关风险，例如，将汽车的使用作为一种服务提供，而不是销售产品。另一种方法是制造商利用技术密切监测司机的行为。

政策制定者也可以采取措施减少制造商的责任。国会可以明令先行出台国家侵权法的救济规则，这种做法有先例可循。如果制造商很难就相关的风险投保，国会还可以设立再保险保障制度。最后，政策制定者（包括法院）可以采纳“人控制汽车”这一不容反驳的推定，维持司机对其驾驶汽车负法律责任的成例。然而，这些方法也都存在明显的不足，责任限制是否必要尚未可知。

政策指南和结论

摆在政策制定者面前的首要问题是，无人驾驶技术所带来的正外部性将在多大程度上造成市场失灵。如上所述，这项技术有可能减少车祸和交通拥堵成本、降低燃料消耗和污染排放、提高机动性、甚至改变土地使用，从而让社会受益无穷。其中一些潜在的效益并非由无人驾驶汽车的买主享受，而是归于普罗大众。由于这些效益并非由买主享受，相关的正外部性不会被纳入这项技术的经济需求。同样，新增的总车辆行驶里程可能

引发包括交通拥堵在内的负外部性。结果可能达不到社会最优水平。综合运用补贴和税收政策或有助于中和这些外部性，但我们目前对这方面的了解不够。

过度规范也会带来风险。各州自行规范无人驾驶技术的做法，可能造成各种要求和规定五花八门的烂摊子，使得无人驾驶汽车无法在各州通行。

依照历史传统，车辆性能由国家公路交通安全管理局考察，驾驶员的表现由州政府主管部门考察。由于无人驾驶汽车本身就是司机——但在某些情况下可能需要人类驾驶员进行某些干预，这种角色分工变得复杂起来。

责任问题也可能延缓这项技术的启用。这可能需要政策制定者探索各种方法加以解决，其中包括：先行出台侵权法规，联邦保险保障制度，将长期的成本效益分析纳入法定的合理性标准，或者继续归责于无人驾驶汽车的人类用户。

总体而言，政策制定者的指导方针应该是，如果无人驾驶技术的表现优于人类驾驶员的平均水平，就应该给予许可。例如，安全规范和责任规则的制定应秉承这一总体指导方针。同样，该原则也可以为法官提供一些指导，法官们在判定产品责任诉讼中特定设计决策是否正当的时候非常纠结。

无人驾驶技术很有希望改善社会福利，但为了充分兑现这种希望，各州和联邦政府需要谨慎决策。一旦无人驾驶技术的成本和效益更加明确，政策制定者可以进行合理的干预，调整该技术的私人 and 公共成本。进一步的研究和体验有助于深入了解这些不确定性。从这个角度看，积极的政策干预时机还不成熟，而且很可能适得其反。