



内容列表可在ScienceDirect上找到

运输研究A部分

杂志主页: www.elsevier.com/locate/tra



驶向安全。需要多少英里的驾驶才能证明自动驾驶汽车的可靠性？



NIDHI KALRA^a, SUSAN M. PADDOCK^a

^a兰德公司, 1776 Main Street, Santa Monica, CA 90401, United States

我的朋友们，你们知道吗？

文章的历史。

2016年3月22日收到的

2016年7月19日收到修改后的表格 2016年9月6日接受

可于2016年9月23日上网查询

关键词。 自主车辆 车辆自

动化 安全

可靠性测试驾

驶

统计学意义

ABSTRACT

自动驾驶汽车的安全性如何？答案对于确定自动驾驶汽车如何影响机动车安全和公众健康，以及制定合理的政策来管理其部署至关重要。评估安全的一个拟议方法是在实际交通中试驾自动驾驶汽车，观察其性能，并与人类驾驶员的性能进行统计比较。这种方法是合乎逻辑的，但它是否实用？在本文中，我们计算了为提供自主车辆安全性的明确统计证据所需的驾驶里程数。鉴于目前的交通伤亡事故与车辆行驶里程相比是罕见的事件，我们表明，完全自主的车辆必须行驶数亿英里，有时甚至数千亿英里，才能证明其在死亡和受伤方面的可靠性。即使在积极的测试假设下，现有的车队也需要几十甚至几百年的时间来驾驶这些里程--如果目的是要在将其释放到道路上供消费者使用之前证明其性能，这是不可能的。这些发现表明，这种技术的开发者和第三方测试者不能简单地以驾驶的方式获得安全。相反，他们将需要开发创新的方法来证明安全性和可靠性。然而，仍有可能无法确定地确定自主车辆的安全性。不确定性将继续存在。因此，当务之急是，自动驾驶汽车法规从一开始就设计成与技术同步发展，以便社会能够更好地利用这些快速发展和潜在的转型技术的好处和管理风险。

© 2016 ELSEVIER LTD. 保留所有权利。

1. 绪论

在美国，每年大约有32,000人在车祸中死亡，200多万人受伤（[交通统计局, 2015年](#)）。美国机动车车祸作为一个整体，一年的经济和社会成本会超过8000亿美元（[BLINCOE等人, 2015](#)）。而且，90%以上的车祸是由人为错误造成的（[国家公路交通安全管理局, 2015年](#)）--如驾驶速度过快和错误判断其他司机的行为，以及酒精损害、分心和疲劳。

自动驾驶汽车有可能通过消除人类司机经常犯的许多错误，大大缓解这一公共卫生危机（[ANDERSON等, 2016](#)；[FAGNANT和KOCKELMAN, 2015](#)）。首先。

* 通讯作者。

电子邮件地址：NIDHI.KALRA@RAND.ORG (N. KALRA)，SUSAN.PADDOCK@RAND.ORG (S.M. PADDOCK)。

自动驾驶车辆从不醉酒、分心或疲劳；这些因素分别涉及所有致命车祸的41%、10%和2.5%（国家公路交通安全管理局，2011；交通统计局，2014¹；美国交通部，2015）。¹他们的表现也可能比人类司机更好，因为他们有更好的感知能力（例如，没有盲点），更好的决策（例如，更准确地规划复杂的驾驶动作，如平行停车）和更好的执行（例如，更快和更精确地控制转向、刹车和加速）。

然而，自主车辆可能不会消除所有的车祸。例如，恶劣的天气和复杂的驾驶环境对自主车辆和人类驾驶员都构成了挑战，自主车辆在某些情况下可能比人类驾驶员的表现更差（GOMES, 2014）。自动驾驶汽车还有可能带来新的、严重的碰撞风险，例如由网络攻击导致的碰撞（ANDERSON等人，2016）。显然，自动驾驶车辆既带来了巨大的潜在利益，也带来了巨大的潜在风险。

鉴于风险很大，政策制定者、运输业和公众正在努力解决一个关键问题：在允许消费者上路使用之前，自动驾驶汽车应该有多大的安全性？然而，要想得到一个有意义的答案，还必须能够解决第二个问题：自主车辆的安全性如何？

也许评估安全的最合理方式是在实际交通中试驾自主车辆，并观察其性能。自主车辆的开发者依靠这种方法来评估和改进他们的系统，²，几乎总是有训练有素的操作员在驾驶室里，在即将发生的故障事件中随时准备控制。³他们可以在事后分析故障事件，以评估自主车辆在没有干预的情况下会做什么，以及是否会导致碰撞或其他安全问题（谷歌，2015）。开发人员在有关自动驾驶汽车监管的听证会上向国会提交了测试驾驶的数据（URMSON, 2016）。

但是，通过试驾来评估自动驾驶汽车的安全性是否实用？人类驾驶员的安全性是比较自主车辆安全性的一个重要基准。而且，即使人类司机造成的车祸、受伤、和死亡的数量很高，但与人们的驾驶里程相比，这些故障率很低。美国人每年驾驶近3万亿英里（交通统计局，2015）。2013年报告的230万起伤害，对应的故障率为每1亿英里77起。2013年的32,719起死亡事故对应的故障率为每1亿英里1.09起死亡事故。

作为比较，谷歌的自动驾驶汽车车队目前有55辆车，在自动驾驶模式下测试行驶了约130万英里，从2009年到2015年涉及11起车祸。BLANCO⁴等人（2016）最近将谷歌车队的表现与人类驾驶的表现进行了比较，。他们发现，谷歌的车队可能会导致较少的车祸，只有财产损失，但他们不能得出结论，在两个关键指标方面的相对表现：伤害和死亡人数。鉴于人类和自动驾驶车辆的故障率，根本没有足够的自动驾驶里程来进行统计学意义上的比较，。

在这份报告中，我们回答了下一个合乎逻辑的问题。多少英里⁵，就足够了？特别是，我们首先要问。

1. 自动驾驶车辆必须行驶多少英里而不发生故障，才能证明其故障率低于某个基准？这为所需的里程数提供了一个下限。

然而，自动驾驶汽车不会是完美的，故障会发生。考虑到不完美的性能，我们接下来要问：

2. 自动驾驶车辆必须行驶多少英里才能证明其故障率达到特定的精确程度？
3. 自动驾驶车辆要行驶多少英里才能证明其故障率在统计学上明显低于人类驾驶员的故障率？

¹这并不意味着53.5%的致命车祸是由这些因素造成的，因为车祸可能涉及，但并不是严格由这些因素之一造成的，而且在一次车祸中可能涉及不止一个这些因素。

²在公共道路上进行广泛的测试对于开发和评估自动驾驶汽车至关重要，因为它们非常复杂，而且需要在各种条件下运行，而且不可预测。相比之下，典型的汽车部件要简单得多，它们的操作条件可以在受控环境中得到很好的定义和重现，这使得实验室测试和验证成为可能。例如，窗帘式气囊的测试结合了组件测试，以评估充气时间、填充容量和在一定温度条件和冲击配置下的其他反应，以及实验室碰撞测试，以评估其在碰撞中的性能（KALTO等人，2001）。

³一些州，如加州，要求任何在公共道路上行驶的自动驾驶车辆的驾驶员必须经过培训（加州车辆法，2012）。

⁴这些车祸中有两起涉及受伤，没有一起涉及死亡。其中7起事故的严重程度没有达到需要向机动车管理局报告的程度（BLANCO等人，2016）。

⁵请注意，并非所有的道路里程都是平等的。用于证明自动驾驶汽车安全性的里程数必须代表人类驾驶的全部条件（气候、地形、拥堵等），并且按比例分配。也就是说，如果10%的人类驾驶里程发生在雪地上，那么自主车辆的测试里程也必须如此。

我们用简单明了的统计方法来回答这些问题中的每一个。鉴于死亡和受伤是罕见的事件，我们将表明，完全自主的车辆⁶，必须行驶数亿英里，有时甚至数千亿英里，以证明其在死亡和受伤方面的可靠性。即使在积极的测试假设下，现有的车队也需要几十甚至几百年的时间来驾驶这些里程--如果目的是在将其释放到道路上供消费者使用之前证明其性能，这是不可能的。

这些结果表明，这种技术的开发者和第三方测试者不能简单地将他们的方式推向安全。相反，他们将需要开发创新的方法来证明安全性和可靠性。这是一个快速增长的、研究和发展的领域。我们希望本文中的数据和数字能够成为开发这些替代方法的有用参考，并成为评估其效率的基准和方法。

接下来的三个部分对每个问题进行了解释、分析和结果。最后我们对结果进行了总结和讨论，并就其对自动驾驶汽车技术的利益相关者的影响得出了结论。

2. 自动驾驶汽车要行驶多少英里而不发生故障，才能证明其故障率低于某个基准？

2.1. 统计方法

我们可以通过将故障率重构为可靠性率并使用基于二项分布的成功运行统计来回答这个问题（[CONNOR和KLEYNER, 2012](#)）。如果一辆车的每英里故障率是 F ，那么可靠性 R 是 $1 - F$ ，可以解释为在任何给定的英里内没有发生故障的概率。在实践中，除非技术是真正完美的，否则在测试过程中很可能会出现故障。⁷然而，一个简单的“无故障”情况（见公式（1））可以用来衡量 MATC 无故障里程数的下限，即 n ，这是建立自主车辆可靠性的信心水平 C 的必要条件。⁸

$$C \geq 1 - R^n$$

这是有用的，例如，如果一个开发者已经驾驶自主车辆行驶了一定数量的无故障里程，并希望知道在特定的信心水平下可以声称的可靠性（或者，等同于故障率）。另外，对于一个给定的置信度 C 和可靠性 R ，我们可以求出 n ，即没有故障的情况下所需的里程数。

$$n \geq \frac{\ln(1 - C)}{\ln R} = \frac{\ln(1 - C)}{\ln R} \quad (2)$$

这个方程式通常用于显示基于使用时间的产品的存活率（[KLEYNER, 2014](#)）。

2.2. 计算实例

为了证明完全自主车辆的死亡率为每1亿英里1.09人（ $R=99.9999989\%$ ），置信度为95%，这些车辆必须行驶2.75亿英里无故障。如果一个由100辆自动驾驶汽车组成的车队以平均每小时25英里的速度每天24小时进行测试，这将需要大约12.5年。

⁶请注意，“自主车辆”一词可以指不同程度的自主性。例如，[国际汽车工程师协会（2014）](#)定义了三个级别的自动驾驶。具有“有条件自动化”的车辆可以在某些条件下自行驾驶，但可能要求人类干预。具有“高度自动化”的车辆可以在某些条件下自行驾驶，不需要人类干预。具有“完全自动化”的车辆可以在人类可以驾驶的所有道路和环境条件下驾驶。本报告中的数字结果评估了证明这最后一类完全自主车辆的可靠性所需的里程。因此，我们使用美国人类驾驶员的总死亡率、受伤率和碰撞率作为基准，来比较自主车辆的性能。然而，本报告中描述的统计方法可用于比较任何自主模式的可靠性。这样做将需要改变人类的性能基准，而这些其他模式都是对照的。

⁷在车辆不完善的情况下，一辆可靠性为 R 的无人驾驶汽车在行驶 N 英里时发生 k 次故障的概率 C 为：

$$C = 1 - \frac{P(k; N, R)}{P(0; N, R)} = 1 - R^N$$

⁸在可靠性测试中， $100(1-\alpha)\%$ 的置信度是指真实故障率在某个范围 $[0, U]$ 内的概率，其中 U 是一个随机变量的上界；或者，等同于真实成功率（可靠性）在 $[1-U, 1]$ 内的概率（[达比, 2010](#)）。一旦观察到数据并估计出 u ，那么 u 就不再是随机的，区间 $[1-u, 1]$ 要么包含，要么不包含真实的故障率。因此，该区间是用置信度而不是概率来描述的（[MARTZ 和 WALLER, 1982](#)）。

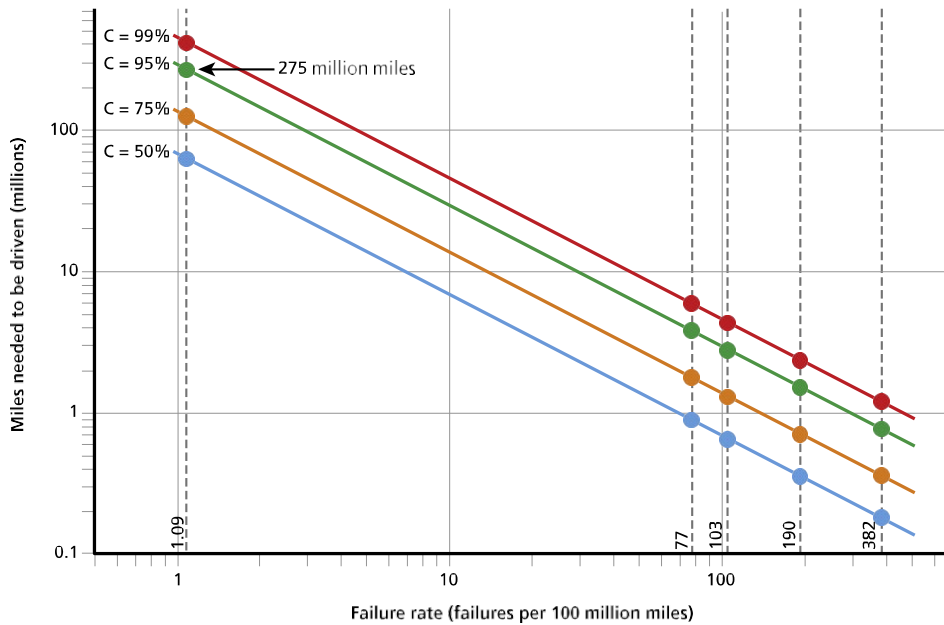


图1.证明最大故障率所需的无故障里程。资料来源：作者的分析。注：四条对角线表示不同置信度的结果。五条垂直虚线表示人类驾驶员在死亡（1.09）、报告受伤（77）、估计总受伤（103）、报告撞车（190）和估计总撞车（382）方面的失败率。

2.3. 结果

图1显示了完全自主的车辆必须行驶多少无故障的里程，以证明最大故障率达到不同的信心水平。我们选择了每1亿英里1-400次故障的范围，以包括人类驾驶员的死亡、受伤和碰撞率范围。作为参考，我们将人类驾驶员的故障率显示为虚线的垂直线。⁹参考线显示的是每亿英里的死亡人数（1.09），报告的受伤人数（77）和报告的撞车人数（190）。众所周知，受伤和撞车的报告可能严重不足：一项研究表明分别为25%和60%（BLINCOE等人，2015）。因此，我们也显示了参考线，可以反映出每1亿英里中人类驱动的伤害（103）和碰撞（382）的更真实估计。图1中注释了对应于95%置信度的2.75亿英里数据点。我们评估了对不同置信度的敏感性，因为不同领域使用不同的标准，导致所需里程数的巨大差异。虽然95%和99%的置信度被广泛使用，但汽车行业有时对汽车部件使用50%的置信度（MISRA, 2008）。对角线代表C=50%、75%、95%和99%。

这一分析表明，就死亡而言，即使我们假设性能完美，也不可能通过试驾自主车辆来证明其安全性达到任何可信的标准。相比之下，人们可以通过驾驶车辆行驶几百万英里来证明伤害和碰撞的可靠性达到可接受的标准。然而，重要的是要认识到，这是一个理论上的下限，基于车辆的完美性能。在现实中，自主车辆会出现故障--不仅是常见的伤害和自主车辆已经参与的碰撞，而且还有死亡事故。我们的第二个和第三个问题量化了在这种现实情况下通过驾驶证明可靠性所需的里程数。

⁹这些比率反映了所有机动车的故障，包括汽车和轻型卡车、摩托车、大型卡车和巴士。人们可以将比较限制在这些数据的某些子集上，例如，省略摩托车死亡事故，其发生率比总体死亡率高20倍（每1亿英里行驶约23人死亡）（交通统计局，2014A）。这不会改变这里显示的统计方法，但证明比较水平所需的里程数会改变。例如，通过省略摩托车的死亡事故，剩余的人类驾驶的死亡率将减少，因此证明可比的自主车辆性能所需的里程数将增加。我们使用总体故障率，因为所有的旅行都有可能发生在自主车辆上，自主车辆也有可能影响所有道路使用者的安全。例如，目前的摩托车手有可能在未来出于安全或其他原因选择乘坐自主客运车辆出行，或者自主客运车辆可能导致更少的摩托车死亡事故，即使摩托车仍然由人驾驶。

3. 自动驾驶车辆必须行驶多少英里才能证明其故障率达到特定的精确程度？

3.1. 统计方法

为了估计真实的自主车辆故障率，我们必须计算在特定情况下发生的事件（故障）数量。

行驶距离。故障率估计为 $\hat{k} = x/n$ ，其中 x 是在 n 个行驶里程中观察到的故障数量。我们可以用 $100(1-\alpha)\%$ 置信区间的宽度来描述故障率估计的精确度

(Ci)。¹⁰如果预计故障数大于30，那么可以使用泊松分布的正态近似值。失败率的近似Ci为：

$$\left(\frac{x - z_{1-\alpha/2} \sqrt{x}}{n}, \frac{x + z_{1-\alpha/2} \sqrt{x}}{n} \right)$$

δ3p

其中 $z_{1-\alpha/2}$ 是标准正态分布的第 $100(1-\alpha/2)$ 个四分位数。¹¹Ci的半宽是

$$\frac{z_{1-\alpha/2} \sqrt{x}}{n}$$

它提供了一个对故障率估计的精确度的估计， \hat{k}

$\frac{1}{4} x = n$ 。我们可以计算出相对于故障估计率的精度为

$$\frac{z_{1-\alpha/2} \sqrt{x}}{n \hat{k}}$$

这可简化为

$$\frac{z_{1-\alpha/2}}{\sqrt{\hat{k}}}$$

如果 d 是我们期望的精确程度（例如，如果我们希望估计的故障率在20%以内， $d=0.2$ ），那么必须观察的故障的数量，以估计故障率的精确程度为 d 。

$$x \geq \frac{(z_{1-\alpha/2})^2}{d^2}$$

δ4
p

如果假设故障率（在数据收集之前）为 k （MATHÉWS, 2010），那么公式（5）意味着必须驾驶的里程数为。

$$x \geq \frac{(z_{1-\alpha/2})^2}{k d^2}$$

δ5p

3.2. 计算实例

我们可以通过以下方式证明这一点。考虑到一些关于其安全性能的初始数据，假设我们假设一个完全自主的车队的真实死亡率为每1亿英里1.09。我们可以利用这一信息来确定所需的样本量（里程数），以估计车队的死亡率，使其在95%的Ci值内达到假设的比率。我们应用公式（4）来估计我们需要观察的死亡人数，然后才有这个水平的死亡率估计的精确度。 $(1.96/0.20)^2 = 96$ （这里，1.96是与标准正态分布的双侧95%Ci相关的Z分数）。我们应用公式（5）来确定这需要多少英里的驾驶。

$$x \geq \frac{(1.96)^2}{1.09 \times 10^{-8} \times 0.2^2} = 811,009,174$$

这大约是88亿英里。如果由100辆自动驾驶汽车组成的车队每天24小时、每年365天以平均每小时25英里的速度进行测试，这将需要大约400年。

¹⁰ 在这种情况下， $100(1-\alpha)\%$ 的Ci是对随机区间 (L, U) 的估计，该区间包含概率为 $(1-\alpha)$ 的真实故障率 k 。如果 l 和 u 是随机变量 L 和 U 的估计值，那么 (l, u) 被称为置信系数为 $(1-\alpha)$ 的 k 的Ci（DEGROOT, 1986）。 $100(1-\alpha)\%$ 的Ci可以解释如下。如果人们运行产生数据的实验并反复进行分析，在 $100(1-\alpha)\%$ 的样本中，在每个实验中计算的 $100(1-\alpha)\%$ 的Ci将包含真实的平均值。

¹¹ 如果事件的数量少于30个，可以选择计算一个精确的Ci（ULM, 1990）。

3.3. 结果

图2显示了完全自主的车辆必须行驶多少英里才能在95%的置信度下估计出不同程度的故障率。必须行驶多少英里才能使故障率估计达到一定的精确程度，随着故障率的增加而减少。对角线代表5%、10%和20%的精度。与图1一样，我们将人类驾驶员的故障率显示为每1亿英里的死亡人数（109）、报告的受伤人数（77）、估计的总受伤人数（103）、报告的撞车人数（190）和估计的总撞车人数（382）的垂直虚线供参考。与这个例子相对应的88亿英里的数据点在图2中做了注释。

这些结果表明，可能不可能以任何合理的精确程度来证明高性能自主车辆（即故障率与人类故障率相当或更好的自主车辆）的可靠性。例如，即使自动驾驶汽车的安全性很低，每1亿英里有几百个故障，这类类似于人类驱动的伤害和碰撞率，证明这一点也需要数千万甚至数亿英里，这取决于所需的精度。对于低故障率--每1亿英里1次，这类类似于人类驾驶的死亡率--要证明任何程度的精确性都是不可能的--需要数十亿到数千亿英里。这些结果表明，随着自动驾驶汽车性能的提高，由于故障事件的极度稀少，要准确评估其性能变得更加困难，甚至不可能。

4. 自动驾驶车辆要行驶多少英里才能证明其故障率在统计学上明显低于人类驾驶员的故障率？

4.1. 显著性检验的统计方法

设置统计学上的显著性检验要求我们指定要检验的无效假设，即故障率 k 大于或等于 k_0 。这里，我们设定 $k_0 = H$ ，即人类驾驶员的故障率。¹²在显著性检验的背景下， α 是显著性水平，或检验的第一类错误率，它被定义为当无效假设为真时拒绝无效假设的概率，换句话说，是一个假阳性。在自动驾驶汽车的背景下，如果数据显示自动驾驶汽车比人类驾驶员表现得更好，而事实上它们并没有这样做，就会出现假阳性，这对政策制定者、技术开发者、保险业，当然还有消费者来说是一个危险的命题。

为了能够以显著性水平 α 检验无效假设，我们可以从公式（3）中检验出置信度上限为估计的故障率是否低于人类驾驶率，即。¹³

$$\frac{x + \frac{z_{1-\alpha}^2}{n}}{n} < H.$$

如果是这样，那么就可以在第1个显著性水平上拒绝无效假设。为了评估什么时候置信度会小于 α ，需要猜测我们预期的自主车辆故障率， k_{ALT} 。我们设定 $k_{ALT} = (1 - \alpha) H$ 。¹⁴为了确定需要多少次故障（和里程）来表明这一点，我们可以求解 x 和 n 。

$$\begin{aligned} x &= \frac{z_{1-\alpha}^2}{2} \left(\frac{1}{k_{ALT}} - \frac{1}{k_0} \right) & (6) \\ n &= \frac{z_{1-\alpha}^2}{2} \left(\frac{1}{k_{ALT}} - \frac{1}{k_0} \right) & (7) \end{aligned}$$

4.2. 显著性检验的计算实例

我们可以证明这一点如下。假设一个完全自主的车队的真实死亡率比人类司机的死亡率（每1亿英里1.09）低 $\Delta=20\%$ ，或每1亿英里0.872。我们应用公式（7）来确定必须行驶的里程数，以95%的置信度证明这一差异具有统计学意义。

$$n = \frac{1.645^2}{2} \left(\frac{1}{0.872 \times 10^{-8}} - \frac{1}{1.09 \times 10^{-8}} \right) = 4; 965; 183; 486$$

这需要大约50亿英里来证明这种差异。如果有一支由100辆自动驾驶汽车组成的车队，以平均每小时25英里的速度，每天24小时，一年365天进行测试，这将需要大约225年。

¹²我们假设 H 是一个已知的基准，而不是对一些未知数量的估计。这给我们提供了需要驾驶的最佳情况下的估计里程数。我们在图4之后讨论这个选择的意义。

¹³这里 z 的下标是 $1-\alpha$ ，因为这是一个单边的假设检验。

¹⁴如果我们对检验 $k > H$ 的另一种假设感兴趣，那么我们就将置信度下限与 H 进行比较： $k > H$ 。

$$\frac{x + \frac{z_{1-\alpha}^2}{n}}{n}$$

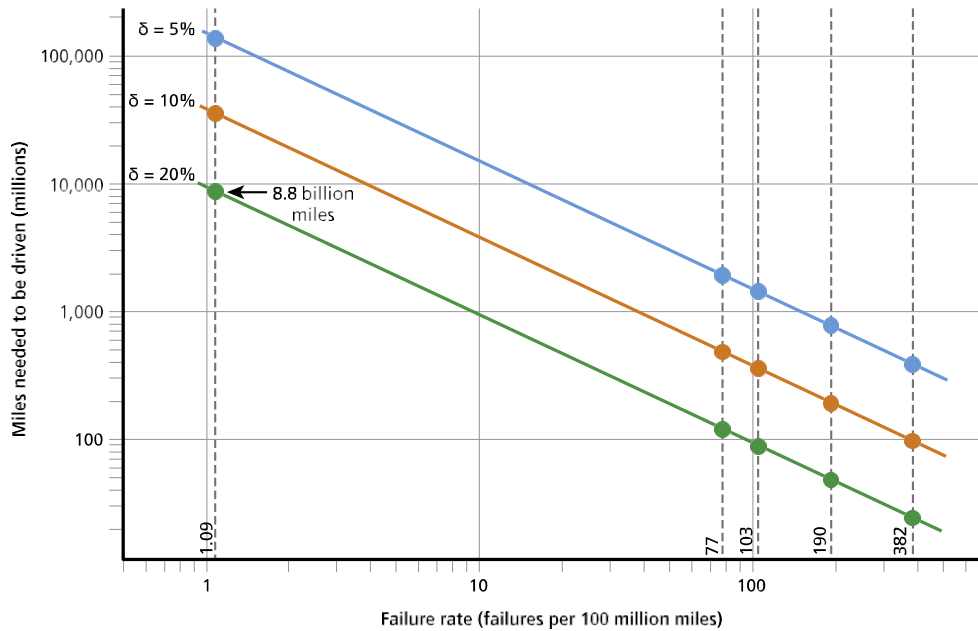


图2.证明失败率达到特定的精确程度所需的里程。资料来源：作者的分析。注：这些结果使用95%的CI。三条对角线显示了不同精确程度d的结果，定义为CI的大小占故障率估计的百分比。五条垂直虚线表示人类驾驶员在死亡人数（1.09）、报告受伤人数（77）、估计总受伤人数（103）、报告撞车人数（190）和估计总撞车人数（382）方面的失败率。

4.3. 显著性检验的结果

图3显示了在不同的A值下，完全自主的车辆需要行驶多少英里才能证明其故障率，在95%的置信度下明显低于人类驾驶员的故障率。不同的线条代表了相对于人类驾驶员死亡率、报告伤害率、估计总伤害率、报告碰撞率和估计总碰撞率的性能。请注意，当人类驾驶率和自主车辆驾驶率之间的差值接近0时，所需驾驶的里程数接近无穷大，也就是说，当 $A \rightarrow 0$ 。这个例子的50亿英里数据点在图3中做了注释。

4.4. 显著性和功率的统计方法

设定显著性水平 α ，是为了解决我们在显著性检验中可能出现的两种错误之一：在无效假设为真时拒绝该假设（第一类错误）。如上所示，确定样本量的一个限制是，它没有考虑到第二类错误（b），这是可能发生的第二类错误：在备选假设为真时没有拒绝无效假设。在自动驾驶汽车的背景下，第二类错误意味着数据表明自动驾驶汽车的性能并不比人类驾驶员好，而事实上它们确实如此。虽然利益相关者可能不太关心，但这也是一个严重的错误，因为它可能会推迟潜在的有益技术的引入，并不必要地延续人类驾驶员所带来的风险。

检验的力量， $100(1-b)\%$ ，是正确拒绝无效假设而支持备选假设的概率。对于给定的英里数，N，以及假设和假定的比率， k_0 和 k_{alt} ，测试的力量是。

$$\text{功率} \approx U \left(\frac{k_0 - k_{alt}}{n} - z_{1-\alpha} \right)$$

88p

其中 $U(\cdot)$ 是累积的标准正态分布。¹⁵在我们的例子基础上，一个符号水平为 $\alpha=0.05$ 的研究，要求行驶大约50亿英里，将有50%的力量来拒绝无效假设。

相反，人们可能想知道自主车辆需要行驶多少英里才能以某种概率避免第一类错误和第二类错误。使用死亡分布的正态近似，在 α 意义上达到 $100(1-b)\%$ 功率所需的里程数N是。

¹⁵ 对于另一个方向的单边测试， $U(\cdot)$ 的第一个分量的分子将是 $k_{alt} - k_0$ 。

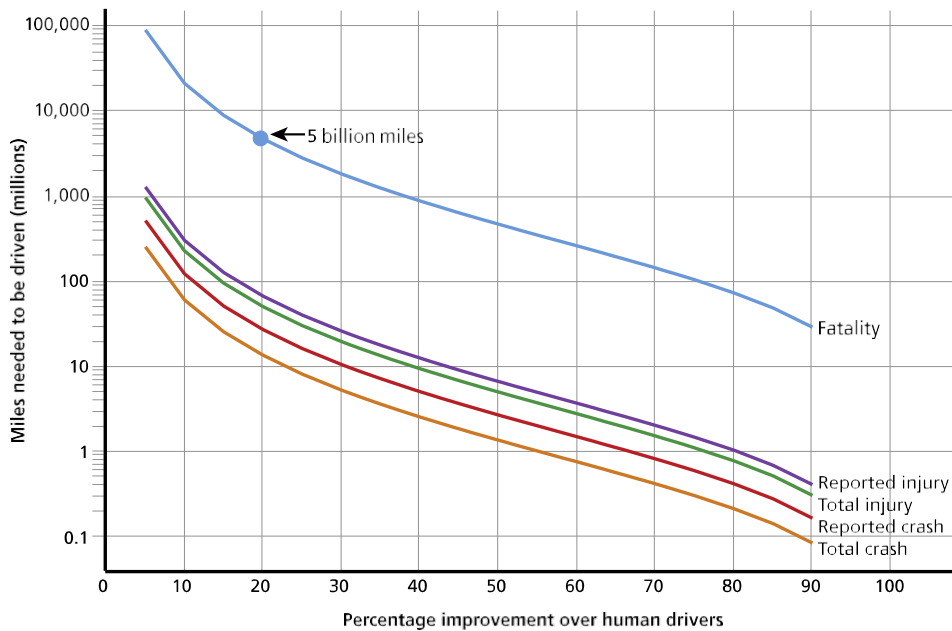


图3.以95%的置信度证明自动驾驶汽车的故障率低于人类驾驶员的故障率所需的里程。资料来源：作者的分析。注：结果取决于自主车辆的估计故障率。这显示在横轴上，定义为比人类驾驶员故障率的改进百分比。可以与人类驾驶员的死亡率、报告的受伤率、估计的总受伤率、报告的碰撞率和估计的总碰撞率进行比较。

$$n \geq \frac{C}{k_{alt}} \frac{z_{1-\alpha}^2 p_{1-b} z_{1-b}^2}{k_0 - k_{alt}}$$

89p

4.5. 显著性和功率的计算实例

继续我们的例子，我们应用公式 (9) 来确定自主车辆必须行驶的里程数，以95%的信心和80%的力量（即 $b=0.2$ ）确定其故障率比人类司机的死亡率好20%。

$$p \geq \frac{0.872 \times 10^{-8} \times 1.645^2}{1.09 \times 10^{-8} - 0.872 \times 10^{-8}} = 11,344,141,710$$

自动驾驶汽车必须行驶超过110亿英里才能发现这一差异。如果一个由100辆自动驾驶汽车组成的车队以平均每小时25英里的速度每天24小时、每年365天进行测试，这将需要518年--大约半个千年。

4.6. 显著性和功率的结果

图4显示了完全自主的车辆要行驶多少英里才能以95%的信心和80%的力量证明其故障率比人类驾驶员的故障率高 $\Delta\%$ 。不同的线条代表了相对于人类驾驶员的死亡率、报告伤害率、估计总伤害率、报告碰撞率和估计总碰撞率的表现。这个例子的110亿英里的数据点在图4中做了注释。

这些结果表明，自主车辆与人类的表现越接近，需要更多的里程来证明差异具有统计学意义。这是有道理的--两个群体的平均值越接近，就需要更多的样本来确定它们是否有显著差异。例如，如果自动驾驶车辆将死亡率提高了5%，而不是20%，那么在95%的置信度和80%的功率下，证明统计学上的显著改善所需的里程数几乎是可笑的：2150亿英里。一支由100辆车组成的车队需要花费近10000年的时间来实现这一目标。事实上，对于死亡率在5%和90%之间的改善，用100辆车的车队行驶必要的里程数是实际的。对于受伤和撞车，在自动驾驶车辆大大优于人类驾驶员之前（25%或更大的改进），证明与人类驾驶员相比有显著差异所需的里程数将是不切实际的。

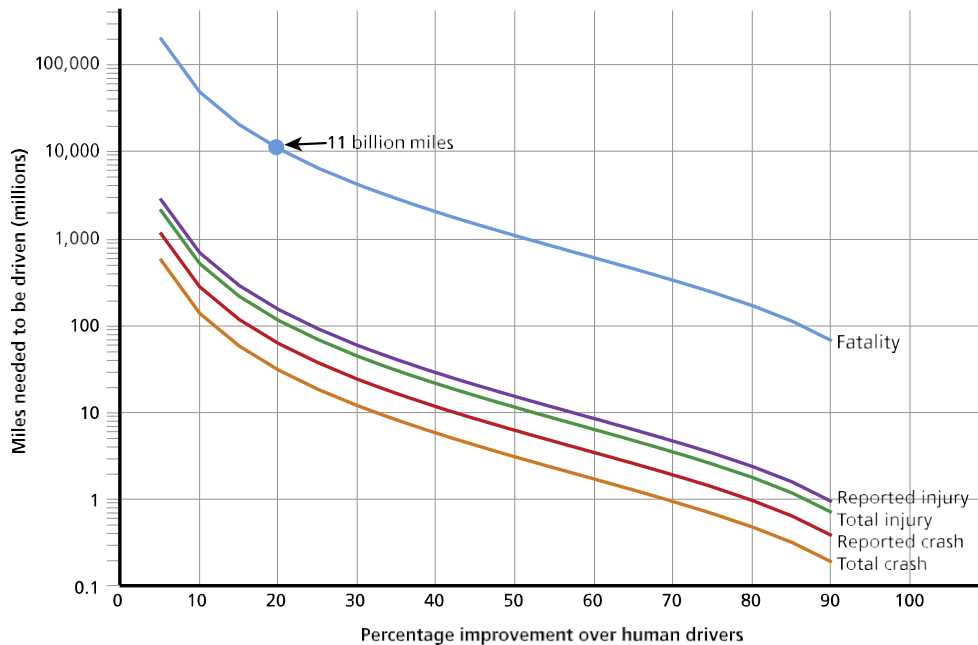


图4.以95%的信心和80%的力量证明自主车辆的故障率低于人类驾驶员的故障率所需的里程数。资料来源。作者的分析。注：结果取决于自主车辆的估计故障率。这显示在横轴上，定义为比人类驾驶员故障率的改进百分比。可以与人类驾驶员的死亡率、报告的受伤率、估计的总受伤率、报告的碰撞率和估计的总碰撞率进行比较。

如果政策问题与我们的提法不同，有可能为考察自动驾驶汽车的可靠性而行驶更少的里程。例如，假设有一个共识，即应该允许自动驾驶汽车上路，只要它们的性能不比人类驾驶的汽车差多少（很小），但预计它们的性能实际上比人类驾驶的汽车好。在这种情况下，可以进行非劣质性测试，并相应地规划样本量（CHOW等人，2008）。

然而，即使这些结果也是乐观的。我们有意将这一分析框架化，以计算为证明自动驾驶汽车和人类驾驶员之间存在统计学上的重大差异所需的最少里程数。首先，随着测试显示出技术的缺陷，开发商可能会改进自动驾驶车辆。车辆的性能将在多年的测试时间框架的开始和结束之间发生变化，希望是更好的。然而，这可能意味着仍然需要更多的里程来证明安全性，因为技术会发生变化。第二，回顾一下，我们把H作为一个已知的基准，我们可以做一个单样本测试。然而，H并不是一个已知的基准，有三个关键原因。首先，人类司机在2013年或任何特定年份的表现不是我们关注的基准。我们关注的是自动驾驶汽车的性能是否优于人类驾驶员的性能，而单一年份的故障数据只是对人类驾驶员故障的真实比率的估计。第二，受伤和撞车的报告严重不足，而且关于报告不足的比率有矛盾的证据。准确记录伤害和车祸的实验可能产生不同的比率。第三，人类的驾驶性能正在发生变化。在过去的几十年里，机动车的死亡率已经下降了。1994年，每1亿英里有1.73起死亡事故，而现在每1亿英里有1.5起死亡事故。

2013年，每1亿英里有1.09起死亡事故（交通统计局，2015）。大部分的下降可以归因于车辆设计的改进（FARMER和LUND，2015），这可能会继续下去。因此，人类驾驶性能的基准是一个移动的目标。因此，如果我们将人类驾驶者的表现与自动驾驶汽车在某个时间段内进行比较，那么这种比较在未来是否会成立，是不确定的。由于所有这些原因，将H视为不确定并使用双样本假设检验是合适的，这将需要观察更多的故障和驾驶里程。这表明，我们不可能通过驾驶来回答关于自动驾驶车辆的最重要的政策问题之一。它们是否比人类驾驶员更安全？

5. 讨论和结论

这份报告框定了三个不同的问题，即自主车辆必须行驶的里程数，作为统计学上证明其可靠性的方法。我们列出了回答这些问题的公式，并预先发送了完全自主车辆的结果，可以作为有兴趣统计测试其可靠性的人的参考。

表1

证明自主车辆可靠性所需的里程和年限的例子。

自动驾驶汽车需要行驶多少英里（年 ^a ），自动驾驶车辆需要行驶多少英里.....		基准失败率		
		(A) 每1亿英里有1.09起死亡事故？	(B) 每1亿英里有77个受伤报告？	(C) 每1亿英里有190起报告的车祸？
		2.75亿英里	3.9万英里（2个月）	1.6 百万（1个月）
统计学问题	(1), 没有未能证明有95%的相信他们的失败率最多是...	(12.5年)		
	(2) 以95%的信心证明他们的失败率在真实比率的20%以内。	88亿（400年）	1.25亿（5.7年）	5100万（2.3年）
	(3) 以95%的信心和80%的力量证明，他们的故障率比人类驾驶员的故障率好20%....	110亿（500年）	16100万（7.3年）	6500万（3年）

^a我们评估了由100辆自动驾驶汽车组成的车队（比任何已知的现有车队都要大），以平均每小时25英里的速度每天24小时行驶，完成必要的里程所需的时间。

表1提供了我们分析的说明性结果。三个编号的行显示了我们关于证明安全所需里程数的三个统计问题的样本结果。有字母的一列显示了三个基准故障率中的每一个样本结果。这些对应于人类驱动的 (A) 死亡率，(B) 报告的受伤率，和 (C) 报告的碰撞率。结果还在括号中显示了由100辆自动驾驶汽车组成的车队以平均每小时25英里的速度每天24小时行驶所需的年数。例如，人们可以问：“自主车辆要行驶多少英里（年）（第2行）才能以95%的置信度证明其故障率在真实比率（A列）的20%以内，即每1亿英里1.09人死亡？”答案是88亿英里，这样的车队将需要400年。

结果显示，自动驾驶汽车必须行驶数亿英里，有时甚至要行驶数万亿英里，才能证明其在死亡和受伤方面的可靠性。即使在积极的测试假设下，现有的车队也需要几十甚至几百年的时间来驾驶这些里程--如果目的是在道路上发布之前证明它们的性能，那么这是不可能的事情。只有碰撞性能似乎可以通过这种统计比较来评估，但这也可能需要几年时间。此外，随着自动驾驶车辆的改进，将需要数百万英里的驾驶来统计验证其性能的变化。

我们的结果证实并量化了这一技术的开发者和第三方测试者不能通过驾驶来实现安全。我们的研究结果支持需要其他方法来补充真实世界的测试，以评估自动驾驶汽车的安全性，并形成适当的政策和法规。这些方法可能包括但不限于加速测试（NELSON, 2009）、虚拟测试和模拟（CHEN和CHEN, 2010；KHASTER等人, 2015；OLIVARES等人, 2015）；数学建模和分析（HOJJATI-EMAMI等人, 2012；KIANFAR等人, 2013）；场景和行为测试（加州机动车管理局, 2015；SIVAK和SCHOTTLE, 2015）；和试点研究（ANWB, 2015），以及对硬件和软件系统的广泛集中测试。

然而，即使有了这些方法，在将自动驾驶汽车提供给公众使用之前，可能也不可能确定其安全性。不确定性将继续存在。这给政策制定者、保险公司和技术开发商带来了重大的责任和监管挑战，也会引起公众的关注。这也表明，试点研究可能是在广泛使用前了解自动驾驶汽车性能的重要中间步骤。这种试点研究需要涉及公私合作，由开发商、保险公司、政府和消费者分担责任。

同时，该技术将迅速发展，它所处的社会和经济环境也将迅速发展。在这样快速变化的环境中，法规和政策不能采取一次性的方法。因此，除了创造新的测试方法外，还必须开始开发有计划的适应性监管方法（CHILDER等人, 2015；WALKER等人, 2010）。

这种监管从一开始就旨在产生新的知识（例如，通过试点研究），审查该知识（例如，通过预定的安全审查委员会），并利用该知识与技术一起发展（例如，通过修改安全要求）。这可以帮助社会更好地利用这些潜在的变革性技术的好处和管理其风险。

利益冲突

在本报告编写期间和发表时，NIDHI KALRA的配偶担任谷歌无人驾驶汽车项目的首席工程师。她的配偶和谷歌都没有对该报告产生任何影响。

鸣谢

我们要感谢ANITA CHANDRA和JAMES ANDERSON的建议和支持，感谢他们帮助指导这项工作有效地完成出版过程。我们感谢LANCET TAN和JEFFREY CHAPPELL的行政工作。

的支持和编辑, 以及MARIA VEGA出色的编辑帮助。我们非常感谢兰德公司的卡罗琳·鲁特和卡内基梅隆大学的康斯坦丁·萨马拉斯, 感谢他们富有洞察力的评论。我们感谢BONNIE GHOSH-DASTIDAR为这项工作联系NIDHI和SUSAN。这项研究的资金是由兰德公司支持者的慈善捐款和业务收入提供的。我们特别感谢兰德公司的司法、基础设施和环境咨询委员会以及国家合作公路研究项目的支持。

参考文献

- ANDERSON, JAMES M., KALRA, NIDHI, STANLEY, KARLYN D., SORONSEN, PAUL, SAMARAS, CONSTANTINE, OLUWATOLA, OLUWATOBI A., 2016.自动驾驶汽车技术。A Guide FOR POLICYMAKERS.兰德公司, RR-443-2-RC, 加州圣莫尼卡。截至2016年1月24日, [HTTP://WWW.RAND.ORG/PUBS/RESEARCH_REPORTS/RR443-2.HTML](http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-2.html)。
- ANWB, 2015.自动驾驶和自动驾驶的实验。2015年概览。截至2016年3月3日。 [HTTP://WWW.ANWB.NL/BESTANDEN/CONTENT/ASSETS/ANWB/PDF/OVER-ANWB/PERSDIENST/RAPPORT_INVENTARISATIE_ZELFRIJDENDE_AUTO.PDF](http://www.anwb.nl/bestanden/content/assets/anwb/pdf/over-anwb/persdientst/rapport_inventarisatie_zelfrijdende_auto.pdf)。
- BLANCO, MYRA, ATWOOD, JOHN, RUSSELL, SHIELDON, TRIMBLE, TAMMY, MCCLAFFERTY, JULIE, PEREZ, MIGUEL, 2016.使用自然数据的自动驾驶车辆碰撞率比较。弗吉尼亚理工大学交通研究所。截至2016年3月3日, [HTTP://WWW.APPS.VT.LI.VT.EDU/PDFS/AUTOMATED%20VEHICLE%20CRASH%20RATE%20COMPARISON%20USING%20NATURALISTIC%20DATA_FINAL%20REPORT_20160107.PDF](http://www.apps.vtli.vt.edu/pdfs/automated%20vehicel%20crash%20rate%20comparison%20using%20naturalistic%20data_final%20report_20160107.pdf)。
- BLINCOE, LAWRENCE, MILLER, TED R., ZALOSH, J., EDUARD, LAWRENCE, BRUCE A., 2015.2010年机动车碰撞事故的经济和社会影响(修订版)。国家公路交通安全管理局, DOT HS 812 013, 华盛顿特区。截至2016年3月3日, [HTTP://WWW.NRD.NHTSA.DOT.GOV/PUBS/812013.PDF](http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/pubs/812013.pdf)。
- 运输统计局, 2014A.摩托车骑手(操作员)安全数据, 表2-22。美国交通部, 华盛顿特区。截至2016年3月3日: [HTTP://WWW.RITA.DOT.GOV/BTS/SITES/RITA.DOT.GOV/BTS/LRS/PUBLICATIONS/NATIONAL_TRANSPORTATION_STATISTICS/HTML/TABLE_02_22.HTML](http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/lrs/publications/national_transportation_statistics/html/table_02_22.html)。
- 运输统计局, 2014B.按车辆数量和酒精参与程度划分的车祸中乘员和非乘员死亡人数(2014年7月更新), 表2-20, 华盛顿特区:美国交通部, 2014B。
- 运输统计局, 2015年。机动车安全数据, 表2-17。研究和创新技术管理局, 美国交通部, 华盛顿特区。截至2016年3月3日: [HTTP://WWW.RITA.DOT.GOV/BTS/SITES/RITA.DOT.GOV/BTS/LRS/PUBLICATIONS/NATIONAL_TRANSPORTATION_STATISTICS/HTML/TABLE_02_17.HTML](http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/lrs/publications/national_transportation_statistics/html/table_02_17.html)。
- 加州机动车管理局, 2015.明确条款 TITLE 13, DIVISION 1, CHAPTER 1 ARTICLE 3.7-AUTONOMOUS VEHICLES, 2015.截止至2016年3月3日。 [HTTPS://WWW.DMV.CA.GOV/PORTAL/WCM/CONNECT/6D6F78FE-F3B8-4100-B5C2-1656F5558411/AVXPRSSSTTERMS.PDF?MOD=AJPERES](https://www.dmv.ca.gov/portal/wcm/connect/6d6f78fe-f3b8-4100-b5c2-1656f5558411/avxprssstterms.pdf?MOD=AJPERES)。
- 加州车辆法, 2012.加州车辆法, 第16.6节。截至2013年11月25日: [HTTP://LEGINFO.LEGISLATURE.CA.GOV/FACE/CODES_DISPLAYSECTION.HTML?LAWCODE=VEH&SECTIONNUM=38750](http://leginfo.ca.gov/pub/face/codes_displaysection.html?lawcode=veh§ionnum=38750)。
- CHEN, SURSEN, CHEN, FENG, 2010.基于模拟的危险驾驶条件下的车辆安全行为评估。J. TRANSPORT.ENG.136 (4), 304–315. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000093](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000093)。截止至2016年3月3日:。
- CHOW, SHEN-CHUNG, SHAO, JUN, WANG, HANSHENG, 2008.临床研究中的样本量计算。CHAPMAN & HALL/CRC生物统计学系列, BOCA RATON, FLA.
- DARBY, JOHN L., 2010.可靠性CON DENCE LIMITS的样本量。SANDIA国家实验室, SAND2010-0550, ALBUQUERQUE, N.M. 截至2016年3月3日, [HTTP://PROD.SANDIA.GOV/TECHLIB/ACCESS-CONTROL.CGI/2010/100550.PDF](http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2010/100550.pdf)。
- DEGROOT, MORRIS H., 1986.概率与统计》。ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY INC, READING, MASS.
- ELCHER, H.G., BAIRD, L.G., BARKER, R., BLOCH, DAUM, B., BORLUM-KRISTENSEN, F., BROWN, J., CHUA, R., DEL SIGNORE, S., DUGAN, U., FERGUSON, J., GARNER, S., GOETTSCHE, W., HAIGH, J., HONIG, P., HOOS, A., HUCKLE, P., KONDO, T., LE CAM, Y., LEUFRENS, H., LIM, R., LONGSON, C., LUMPKIN, M., MARAGANORE, J., O'ROURKE, B., OYE, K., PEZALLA, E., PIGNATTI, F., RAIN, J., RASI, G., SALMONSON, T., SAMAH, D., SCHNEWEISS, S., SIVIERO, P.D., SKINNER, M., TAGARDEN, J.R., TOMINAGA, T., TRUSHEIM, M. R., TUNIS, S., UNGER, T.F., VAMVAKAS, S., HIRSCH, G., 2015.从适应性许可到适应性路径: 提供一个灵活的生命周期方法, 将新药带给患者。CLIN.PHARMACOL.THER.97 (3), 234–246. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1002/CPT.593](http://dx.doi.org/10.1002/CPT.593)。截止至2016年4月1日。
- FAGNANT, DANIEL J., KOCKELMAN, KARA, 2015.为自动驾驶汽车准备一个国家: 机会、障碍和政策建议。TRANSPORT.RES. A部分: 政策实践. 77, 167–181. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.TRA.2015.04.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003)。7月 截至2016年3月3日。
- FARMER, CHARLES M., LUND, ADRIAN K., 2015.车辆重新设计对驾驶员死亡风险的影响。《交通伤害预防》(10月)。截至2016年3月3日, [HTTP://WWW.IHF5.ORG/BIBLIOGRAPHY/TOPIC/2073](http://www.ihf5.org/bibliography/topic/2073)。
- GOES, LEE, 2014.谷歌自动驾驶汽车的隐藏障碍。令人印象深刻的进展隐藏着谷歌对自动驾驶的主要限制。马萨诸塞州技术研究所。截至2016年3月3日, [HTTPS://WWW.TECHNOLOGYREVIEW.COM/S/530276/HIDDEN-OBSTACLES-FOR-GOOGLS-SELF-DRIVING-CARS/](https://www.technologyreview.com/s/530276/hidden-obstacles-for-googles-self-driving-cars/)。
- 谷歌, 2015年。谷歌自动驾驶汽车测试报告, 关于自主模式的脱离情况。截至2016年3月3日, [HTTPS://WWW.DMV.CA.GOV/PORTAL/WCM/CONNECT/DF67186-70DD-4042-BC8C-D7B2A9904665/GOOGLDISENGAGEMENTREPORT2014-15.PDF?MOD=AJPERES](https://www.dmv.ca.gov/portal/wcm/connect/df67186-70dd-4042-bc8c-d7b2a9904665/googledisengagemntreport2014-15.pdf?MOD=AJPERES)。
- HOJJATI-EMAMI, KHAHAYAR, DHILLON, BALBIR, JENAB, KOUROUSH, 2012.配备高级驾驶辅助系统(ADAS)和被动安全系统(PSS)的车辆的可信度预测。INT.J.INDUST.工程。计算。3 (5), 731–742. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.5267/J.IJEC.2012.08.004](http://dx.doi.org/10.5267/J.IJEC.2012.08.004)。截至2016年4月1日。
- KALRO, HELEN, WINKELBAUER, DAVID, HAYENS, CHRIS, SMITH, MICHAEL, 2001.响应FMVSS 2010对窗式侧气囊要求的测试方法的进步。国际汽车工程师学会。技术文件2001-01-0470。截止至2016年4月1日。 [HTTP://DX.DOI.ORG/10.4271/2001-01-0470](http://dx.doi.org/10.4271/2001-01-0470)。
- KHASTGIR, SIDDARTHA, BIRRELL, STEWART A., DHADYALLA, GUNWANT, JENNINGS, PAUL A., 2015.为汽车系统的虚拟验证开发一个嵌入式驾驶员电子回路全沉浸式驾驶模拟器。论文发表在IEEE第81届车辆技术会议上, 苏格兰格拉斯哥, 2015年5月11-14日。截至2016年4月1日: [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1109/VTCSPRING.2015.7145775](http://dx.doi.org/10.1109/VTCSPRING.2015.7145775)。
- KIANFAR, R., FALCON, P., FREDRIKSSON, J., 2013.自动驾驶系统的安全验证。IEEE INT.ELL.TRANSP.SYST.MAG.5 (4), 73–86. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1109/MIITS.2013.2278405](http://dx.doi.org/10.1109/MIITS.2013.2278405)。冬季截至2016年4月1日:。
- KLERNER, ANDRE, 2014.汽车环境中的应力变化将如何影响加速测试所证明的可靠性的“真实”值。SOC. AUTOMOTIVE ENG. INT. 7 (2), 552–559. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.4271/2014-01-0722](http://dx.doi.org/10.4271/2014-01-0722)。截止至2016年3月3日。
- MARTZ, H.F., WALLER, R.A., 1982.贝叶斯可靠性分析。JOHN WILEY & SONS, HOBOKEN, N.J.
- MATHEWS, PAUL, 2010.样本大小计算。工程师和科学家的实用方法》。MATHEWS, MALNAR AND BAILEY INC, FAIRPORT HARBOR, OHIO.MISRA, KRISHNA.B. (ED.), 2008.可执行性工程手册》。SPRINGER, NEW YORK.
- 国家公路交通安全管理局, 2011年。交通安全事实。碰撞统计。国家统计和分析中心, 华盛顿特区, DOT HS 811 449。截至2016年3月3日。 [HTTP://WWW-NRD.NHTSA.DOT.GOV/PUBS/811449.PDF](http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pubs/811449.pdf)。
- 国家公路交通安全管理局, 2016年。交通安全事实, 简要统计摘要: 全国机动车碰撞原因调查中调查的碰撞的关键原因。美国交通部国家统计与分析中心, 华盛顿特区, DOT HS 812 115。截至2016年3月3日。 [HTTP://WWW-NRD.NHTSA.DOT.GOV/PUBS/812115.PDF](http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pubs/812115.pdf)。
- NELSON, WAYNE B., 2009.加速测试统计模型、测试计划和数据分析。JOHN WILEY & SONS, HOBOKEN, N.J. O'CONNOR, PATRICK, KLEYNER, ANDRE, 2012.PRACTICAL RELIABILITY ENGINEERING.JOHN WILEY & SONS, HOBOKEN, N.J.
- OLIVARES, STEPHANIE, REBERNIK, NIKOLAUS, ELCHER, ARNO, STADLOBER, ERNST, 2015.高级驾驶辅助系统的虚拟随机测试。IN: SCHULZE, TIM, MÜLLER, BEATE, MEYER, GERON.(EDS.), 2015年汽车应用的先进微系统。绿色和自动驾驶的智能系统。斯普林格, 纽约。

- SIVAK, MICHAEL, SCHOTTLE, BRANDON, 2015.我们是否应该要求对自动驾驶车辆进行许可测试和分级许可? 密歇根大学交通研究所。技术报告UMTRI-2015-33。
- 国际汽车工程师学会, 2014年。自动驾驶。新的SAE国际标准J3016中规定了驾驶自动化的级别。截至2016年3月3日 : <[HTTP://WWW.SAE.ORG/MISC/PDFS/AUTOMATED_DRIVING.PDF](http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf)>。
- 美国交通部, 2015年。2013年分心驾驶。统计结果摘要, DOT HS 812 132。
- ULM, KURT., 1990.计算标准化死亡率 (SMR) 的置信区间的简单方法。AM.J. EPIDEMIOLOGY 131 (2), 373-375.
- FEB. URMSON, CHRIS. 2016."HANDS OFF: THE FUTURE OF SELF-DRIVING CARS" TESTIMONY BEFORE THE SENATE COMMITTEE ON COMMERCE, SCIENCE AND TECHNOLOGY HEARING, 华盛顿特区, 2016年3月15日。AS OF MARCH 22, 2016: <[HTTP://WWW.COMMERCE.SENATE.GOV/PUBLIC/_CACHE/FILES/5C329011-BD9E-4140-B046-A595B4C89EB4/BEFADFE023327834146FF4378228B8CC6600GLE-URMSON-TESTIMONY-MARCH152016.PDF](http://www.commerce.senate.gov/public/_cache/files/5c329011-bd9e-4140-b046-a595b4c89eb4/befadfe023327834146ff4378228b8cc6600gle-urmson-testimony-march152016.pdf)>.
- WALKER, WARREN E., MARSHAU, VINCENT A.W.J., SWANSON, DARRIN, 2010.使用适应性政策解决深度不确定性: 第2节介绍。
- TECHNOL.预测。SOC. CHANGE 77 (6), 917-923. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.TECHFORE.2010.04.004](http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2010.04.004).7月 截至2016年3月3日 : 。