

对于等级二与等级三自动驾驶概念中人为因素的评估

1. 引言

1.1. 研究目的

本研究的目的是探究人类驾驶员与等级二、等级三自动驾驶系统之间的互动关系。具体来说，人类驾驶员能否在需要的时候接管车辆，以及他们能否处理好在必要的时候接管车辆与放任系统继续运行之间的平衡。

1.2. 背景介绍

自动驾驶等级

等级二：驾驶员需要时刻监视路面，做好随时接管车辆的准备。

等级三：驾驶员在接管车辆之前能得到提示，拥有充足的准备时间。

2. 实验 1：警告驾驶员重新接管等级二自动驾驶车辆

2.1. 实验目的

由于等级二自动驾驶要求驾驶员监视路面情况并随时做好在短时间内接管车辆的准备，本实验旨在探究何种警告方式对于帮助驾驶员在短时间内接管车辆最为有效。

2.2. 实验方法

驾驶员将驾驶 90 分钟的等级二自动驾驶车辆，并在驾驶过程中接受指示做一些与驾驶无关的任务（如浏览网页、收发邮件、使用导航等）。在驾驶过程中，他们将会接收到自动驾驶系统所发出的“要求接管车辆”的警告。系统发出的警告设有不同的警告模式与警告程度，分为两种警告模式：单模式、多模式，与 3 种警告程度：注意警告、突发警告、阶段警告。

警告模式	
单模式	有且仅有视觉警告
多模式	视觉+触觉警告（座椅振动）
警告程度	
注意警告	亮 30 秒黄灯
突发警告	亮 30 秒红灯
阶段警告	亮 10 秒黄灯+20 秒红灯

将 3 种警告程度与 2 种警告模式进行组合，可以得到 6 种不同的警告方式。每种警告方式将对每位驾驶员测试 3 次，共计 18 次测试。

此外，还将进行 1 次自动驾驶车辆意外偏离车道的实验。实验员在保证安全的前提下，触发开关，模拟自动驾驶系统失效。此时车辆将偏离车道中心，自动驾驶系统将以多模式（视觉+触觉）突发警告（亮红灯）提醒驾驶员接管车辆。

实验过程中，通过摄像头记录驾驶员对这 19 次警告所产生的反应。

驾驶员面部	过肩车内视角	前窗视角	后窗视角
踏板	人机交互界面	左侧车外视角	右侧车外视角

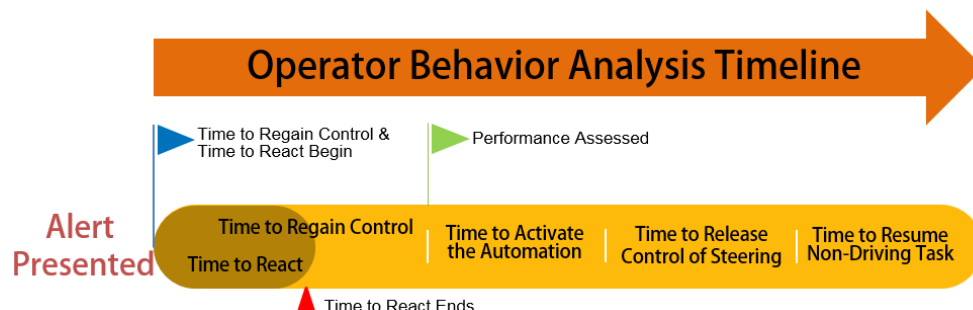
摄像头排布示意图：



对于驾驶员的反应的评估分为以下几个时间段：

		起始时间点	终止时间点
对警告有反应的时间（秒）		警告发出	驾驶员有所反应
重新控制车辆的时间（秒）		警告发出	驾驶员握住方向盘
释放控制的时间（秒）	激活自动驾驶系统	系统就绪	驾驶员激活系统
	释放方向盘	系统激活	驾驶员松开方向盘
继续执行其他任务的时间（秒）		松开方向盘	驾驶员继续任务

反应流程示意图：



2.3. 实验结果

2.3.1 关于警告模式与警告程度的总结

类型	驾驶员重新控制车辆的时间	
	单模式（视觉）	多模式（视觉+触觉）
注意警告（黄灯）	6.3 秒	1.1 秒
阶段警告（黄灯+红灯）	5.3 秒	1.4 秒
突发警告（红灯）	2.9 秒	1.3 秒
平均	4.8 秒	1.3 秒

由上表可见，多模式状态能使驾驶员更快地重新控制车辆。这可能是因为多模式状态的触感（振动）可以使驾驶员在执行其他任务的时候能够察觉到自动驾驶系统的警告。在多模式状态下，驾驶员对于突发警告与注意警告的反应时间相同的实验结果也佐证了这一观点。由上表还可以发现，突发警告（亮红灯）能使驾驶员更快地重新控制车辆。这可能是因为注意警告的黄灯相比于突发警告的红灯不够醒目，这使得驾驶员在处理其他任务是容易忽视注意警告。因此，在设置注意警告的时候必须包含非视觉（如触觉）的警告方式。

2.3.2 关于意外偏离车道时警告模式的总结

	驾驶员重新控制车辆的时间（多模式突发警告）
正常行驶时	1.3 秒
意外偏离车道时	1.2 秒

面对意外偏离车道的情况时，驾驶员重新接管车辆的时间与正常行驶时一致。然而，这可能是由于驾驶员在意识到车道偏离之前，接收到了多模式突发警告，从而下意识地立即做出反应。这也证明了多模式突发警告可以很好地预防突发事件的发生。

3. 实验 2：提醒驾驶员在驾驶等级二自动驾驶车辆时注意路面情况

3.1. 实验目的

由于等级二自动驾驶要求驾驶员监视路面情况并随时做好在短时间内接管车辆的准备，设计一种能在驾驶员因其他任务而分神时，提醒驾驶员注意路面情况的自动提醒机制是必要的。本实验旨在探究何种机制对于提醒驾驶员集中注意力最为有效。

3.2. 实验方法

驾驶员将驾驶等级二自动驾驶车辆行驶三段路程，每段 60 分钟，并在驾驶过程中接受指示做一些与驾驶无关的任务（如浏览网页、收发邮件、使用导航等）。在驾驶过程中，根据不同的提醒条件，他们将会在因其他任务而分神时接收到自动驾驶系统发出的提醒。本实验中，提醒条件分为三种：2 秒提醒、7 秒提醒与无提醒。每次提醒将分为四个阶段，每个阶段都有不同的提醒模式（视觉、触觉、听觉）并将延时 5 秒。所有提醒均在驾驶员做出反应（观察路面情况）后静默。

提醒条件与提醒模式一览				
从驾驶员分散注意开始计时	无提示	视觉（黄灯）	视觉（红灯）+触觉	视觉（红灯）+触觉+听觉
2 秒提醒	0-2 秒	2-7 秒	7-12 秒	12 秒以后
7 秒提醒	0-7 秒	7-12 秒	12-17 秒	17 秒以后
无提醒	/			

此外，为了模拟自动驾驶系统的异常工作状态，本实验设定了三种不同的驾驶事件：正常行驶、意外偏离车道且有警告、意外偏离车道且无警告。发出警告的方式为前文所述的多模式（视觉+触觉）突发警告。在驾驶过程中，这三种事件将会随机发生。

实验过程中，通过摄像头记录自动驾驶系统发出提示前后，驾驶员的状态与车辆运行的状态。

驾驶员面部	过肩车内视角
	前窗视角
人机交互界面&方向盘	左侧车外视角
	踏板

摄像头排布示意图：



通过处理摄像头所记录的驾驶员面部状态数据，定量分析驾驶员在不同时间段内（提醒前、提醒后、无提醒）对于路面状况的注意程度。计算公式为：

$$\text{驾驶员在取样时间内的监视率} = \frac{\text{取样时段内驾驶员观察路面的时长}}{\text{取样时段总时长}} * 100\%$$

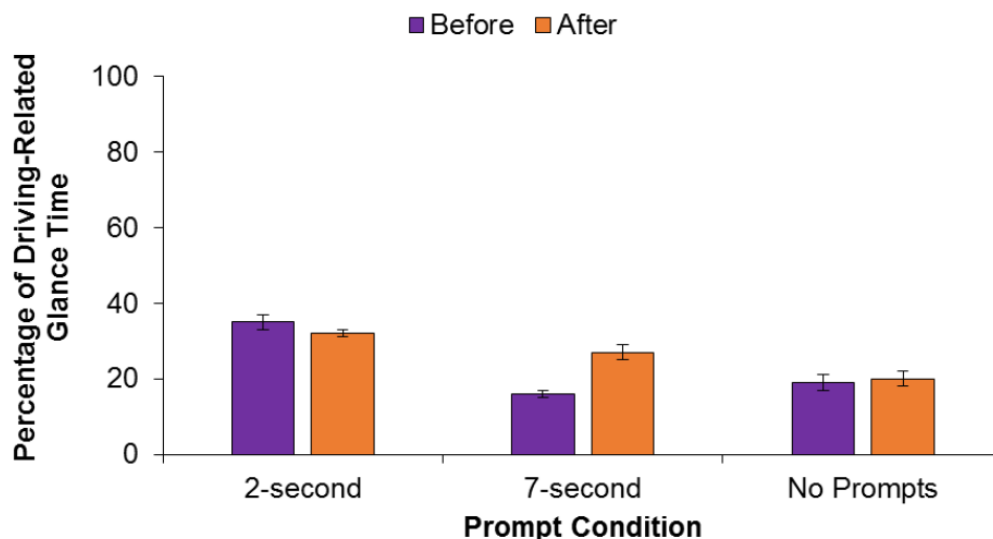
根据不同情况，时间段的取样方法也有所不同：

行车状态	取样方法
意外车道偏离	偏离前 10 秒~偏离后 60 秒
有提醒（2 秒提醒或 7 秒提醒）	提醒前 15 秒~提醒后 15 秒
无提醒	任意时间点前 15 秒~后 15 秒

3.3. 实验结果

3.3.1. 关于提醒条件的总结

总体而言，提醒系统对于提升驾驶员对于路面状况的关注程度是有效的，特别是在 7 秒提醒发生后，驾驶员对于路面的关注程度相比于提醒前有明显的上升。这可能是因为 7 秒提醒发生的时候，驾驶员的注意力相比于 2 秒提醒时更容易分神。然而，2 秒提醒时驾驶员对于路面的关注程度仍然高于 7 秒提醒，因为 2 秒提醒比 7 秒提醒更为频繁。所以，从安全性的角度考虑，更推荐采用 2 秒提醒的提醒条件。



3.3.2. 对于驾驶事件的总结

实验证明，多模式突发警告对于让驾驶员在意外偏离车道时重新操控车辆非常有效。在意外偏离有警告的情况下，驾驶员重新操控车辆的平均时间为 2.4 秒，而且在 55 次实验中只有 1 次未成功接管。然而，在无警告的情况下，驾驶员重新操控车辆的平均时间为 4.4 秒，而且在 49 次实验中有 23 次未成功接管。综上所述，警告系统对于安全驾驶有至关重要的意义。

	意外偏离车道时，驾驶员重新操控车辆所用时间	
	有警告（多模式突发）	无警告
2 秒提醒	2.0 秒	4.6 秒*
7 秒提醒	2.5 秒	3.9 秒*
无提醒	2.6 秒	5.0 秒*
平均	2.4 秒	4.4 秒*

*仅统计成功接管的实验案例

4. 实验 3：警告驾驶员在重新接管等级三自动驾驶车辆

实验目的

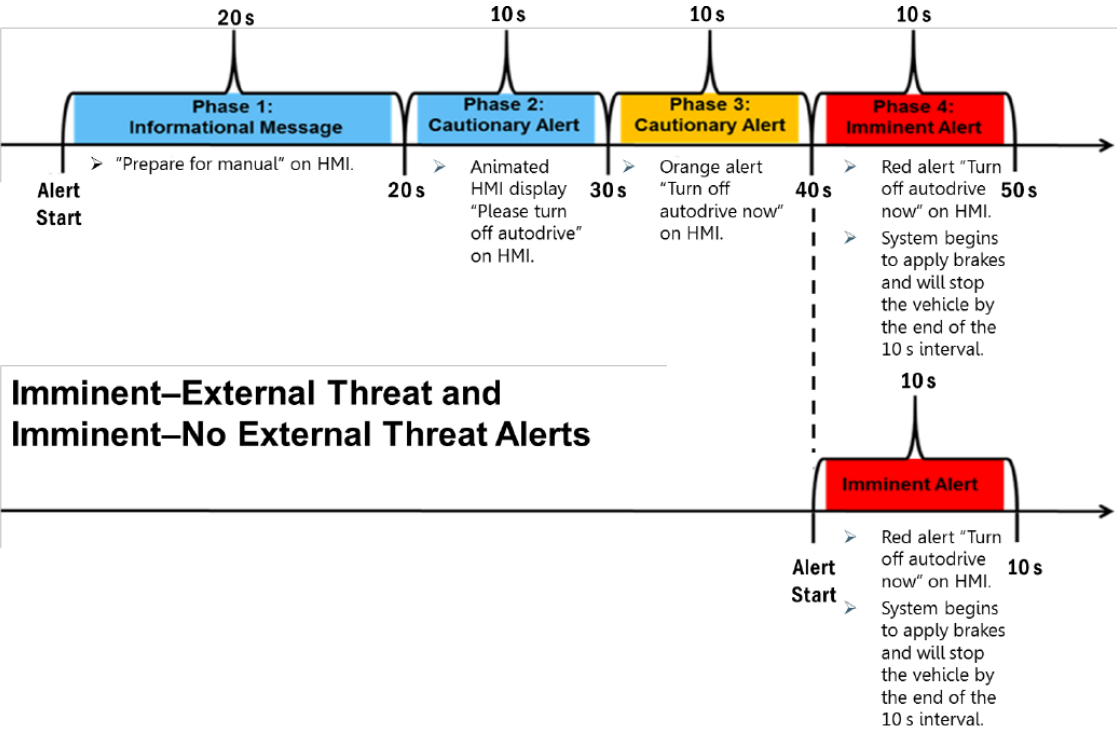
根据定义，等级三自动驾驶系统并不要求驾驶员时刻监视路面情况，仅在偶尔的情况下需要驾驶员接管车辆，并且在接管车辆前，驾驶员能有充足的准备时间。这表明，适用于等级三驾驶系统的警告模式应与实验 1 中适用于等级二驾驶系统的警告模式有所不同。本实验旨在探究对于等级三自动驾驶系统，何种警告方式能更好地确保行车安全。

4.2. 实验方法

驾驶员将驾驶等级三自动驾驶车辆，并在驾驶过程中随意做与驾驶无关的任务（如浏览网页、收发邮件、使用导航等）。在驾驶过程中，他们将会接收到自动驾驶系统所发出的“要求接管车辆”的警告。驾驶员将对这些警告做出反应，他们的反应时间与方式会被记录。

系统发出的警告设三种有不同的警告方式，分为阶段警告，突发无威胁警告，突发有威胁警告。

阶段	撞击前剩余时间	阶段警告	突发无威胁警告	突发有威胁警告
4	0~10 秒	人机交互界面显示红色警告：“立刻关闭自动驾驶系统”；系统开始刹车，车辆在 10 秒后停下		
3	10~20 秒	人机交互界面显示橙色警告：“立刻关闭自动驾驶系统”		
2	20~30 秒	人机交互界面显示：“请关闭自自动驾驶系统”		
1	30~50 秒	人机交互界面显示：“请准备手动操控”		



实验过程中，通过摄像头记录自动驾驶系统发出提示前后，驾驶员的状态与车辆运行的状态。

驾驶员面部	过肩车内视角
	前窗视角
人机交互界面&方向盘	左侧车外视角
	踏板

摄像头排布示意图：



通过处理摄像头所记录的驾驶员面部状态数据，定量分析驾驶员在不同时间段内（提醒前、提醒后）对于路面状况的注意程度。计算公式为：

$$\text{驾驶员在取样时间内的监视率} = \frac{\text{取样时段内驾驶员观察路面的时长}}{\text{取样时段总时长}} * 100\%$$

在本实验中，对于每次警报前后时间段的取样分为三种：

次数	取样方法
1	警报发出前 65 秒~警报发出前 55 秒
2	警报发出前 10 秒~警报发出时
3	警报发出时~驾驶员成功接管车辆时

4.3. 实验结果

4.3.1. 对于驾驶员反应时间的总结

从警告发出开始计时	阶段警告	突发警告无威胁	突发警告有威胁
驾驶员产生反应所用时间	1.2 秒	0.7 秒	0.7 秒
驾驶员接管车辆所用时间	17.0 秒	2.3 秒	2.1 秒
驾驶员释放方向盘所用时间	1.4 秒	1.8 秒	2.7 秒

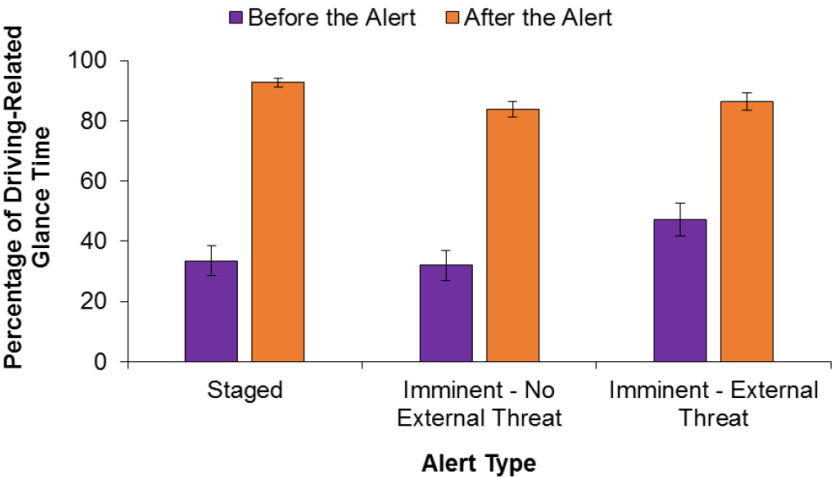
可以看出，在警告发出后，驾驶员产生反应所用的时间相差无几，但在接管车辆的用时长，即使注意到了“请关闭自动驾驶系统”的信息，驾驶员普遍没有立刻按提示操作。由此可见，在警告程度方面，突发警告比阶段警告更能引起驾驶员的重视。

另外，在警告解除后，之前的警告程度越严重，驾驶员将会越晚释放方向盘。这说明在驾驶等级三自动驾驶车辆遭遇到具有威胁的交通状况后，驾驶员对于自动驾驶系统的信任度可能会降低。

4.3.2. 对于驾驶员在警告发出前后对路面情况关注度的总结

		阶段警告	突发警告无威胁	突发警告有威胁
驾驶员对于路面情况的监视率	警告发出前	33.5%	32.0%	47.1%
	警告发出后	92.7%	83.8%	86.4%

可以看出，即使等级三驾驶系统并不需要驾驶员时刻监视路面，在三种警告发生后，驾驶员对于路面情况的关注程度相比于警告发生前都有显著上升。这表明，警告系统对于提升等级三自动驾驶车辆的行车安全也有着重要的意义。



等级二与等级三自动驾驶系统中人为因素的评估						
因变量	实验 1		实验 2		实验 3	
从警告发出到做出反应的时间	警告模式： 单模式、多模式	多模式时更短	提醒模式： 2 秒提醒、7 秒提醒、无提醒	无影响	阶段警告	更可能在提示（第一、二）阶段做出反应
	警告类型： 提醒警告、突发警告、阶段警告	无影响	事件类型： 有警告、无警告	有警告时更短	突发警告： 有威胁、无威胁	无影响
从警告发出到接管车辆的时间	警告模式： 单模式、多模式	多模式更短	有警告时更短且更稳定 无警告时，49 次中有 23 次未接管； 有警告时，54 次中有 1 次未接管		阶段警告	更可能在提示（第一、二）阶段接管车辆
	警告类型： 提醒警告、突发警告、阶段警告	突发警告最短			突发警告	无影响
从接管车辆到激活驾驶系统的时间	多模式短于单模式		在意外偏离车道后，无警告短于有警告		无影响	
从释放控制到做其他任务的时间	突发警告最短		无影响		无影响	
路面情况监视率	多模式更高		与提醒频率正相关		收到警告后更高	

5. 讨论与总结

5.1. 研究问题 1: 驾驶员怎样与等级二和等级三级别的自动驾驶系统交互?

当驾驶员被警告有意外事件发生时, 他们能在很短的时间内接管车辆。值得注意的是, 当突发警告发生时, 驾驶员所面临的意外情况的危险程度都很低。然而, 仍然存在着一些警告被驾驶员所忽视, 为了保障行车安全, 人机交互界面的设计变得至关重要。数据显示, 对于纯视觉的注意警告, 驾驶员的反应会延迟, 甚至于完全忽视。不过, 即便如此也不能简单的把视觉与其他感官(如触觉, 听觉等)直接组合, 因为这种形式可能会招致驾驶员的反感。

5.2. 研究问题 2: 在驾驶员从事其他任务时, 自动驾驶系统存在什么样的风险?

实验表明, 一些驾驶等级二自动驾驶车辆的驾驶员, 在从事其他任务时会忽视第一阶段的专注提醒(5秒视觉)。也有一些驾驶等级三自动驾驶车辆的驾驶员, 直到第二阶段前(第一阶段20秒的接管提醒过后)才选择接管车辆。这些数据表明当驾驶员在从事其他任务时, 他们会把其他任务的优先度排在驾驶任务之前。因此, 这种“必须先做完其他事情”的压迫感会延迟他们对于和驾驶任务相关的提醒与警告的反应。

5.3. 研究问题 3: 在自动驾驶系统与驾驶员之间, 最有效的“脱把策略”是什么?

在本实验中, 那些最有效的“脱把策略”是包含了非视觉要素的提醒或警告方案。在实验1与实验2中, 驾驶员在接收到了视觉与触觉警告后, 接管车辆时最为迅速。另外, 在实验2中, 很多驾驶员甚至会遗漏视觉提醒, 只对其他感官(如: 触觉、听觉)提醒有所反应。因此, 将非视觉因素加入“脱把策略”能使驾驶员在做其他任务时, 能够及时回归到首要的驾驶任务上。

有趣的是, 在实验3中, 驾驶员在接收到视觉+听觉的预警信息后, 他们接管车辆的时间会有大幅度的延迟。这延迟可能是因为人机交互界面显示“请‘准备’接管车辆”而不是“立即接管车辆”, 并且还配备了一个倒计时来显示他们还有多少时间。因此, 如果智能驾驶系统告诉驾驶员他们还有时间准备接管车辆, 很多人会选择用这段时间做完手头上的其他任务。

5.4. 研究问题 4: 驾驶员是如何参与、脱离、再参与驾驶任务的?

驾驶等级二自动驾驶车辆的驾驶员在接管车辆时倾向于转动方向盘。这个过程平均花费1.3到2.4秒。驾驶等级三自动驾驶车辆的驾驶员在收到提示要求接管车辆时, 驾驶员倾向于摁下按钮关闭自动驾驶系统。不过, 这个过程平均花费的时间长达17秒。若他们收到的是突发警告, 则会倾向于踩下刹车踏板。这个过程花费的时间少于2.3秒。

随后, 在自动驾驶系统准备就绪后, 驾驶员平均花费少于4.6秒释放车辆的控制。这个时间的长短会有所波动, 取决于驾驶员是否认为在第一阶段警告后, 自动驾驶系统会继续发出更加严重的警告。

5.5. 研究问题 5: 在等级二与等级三自动驾驶系统的运行概念中, 驾驶员该怎么做?

关于三次实验中在不同状况下驾驶员的表现, 共同的规律是: 当驾驶员充分使用人机交互界面的时候, 他们的行车表现非常好。反之, 当驾驶员因为忙于其他任务而忽视了人机交互界面的信息(如: 视觉信息)时, 他们的行车表现就会有问题, 因为等级二自动驾驶系统要求驾驶员时刻监视路面情况。

实验还发现了一个很有意思的现象: 当驾驶员行车接近路上的其他车辆时, 他们会快速地

释放控制，将控制权交给自动驾驶系统。这表明，随着时间的推移，驾驶员对于部分自动驾驶系统的信任程度是保持不变的。

5.6. 研究问题 6：什么样的人机交互界面对于优化等级二与等级三自动驾驶系统的安全是最有效的？

对于人机交互界面而言，最有效的是那些既包含了视觉警告也包含了非视觉警告的设计。当驾驶员从事其他任务的时候，他们中有一些会把驾驶任务和其他任务本末倒置，倾向于去有优先完成其他任务。这种现象是对自动驾驶系统的过分依赖，并且可能会抵消自动驾驶系统的升级所带来的安全红利。当驾驶员从事一些主要依赖视觉的非驾驶任务时，一套含有触觉和听觉警告系统的人机交互界面，比起那些仅有视觉警告系统的，可以更加成功地吸引他们的注意力。

当然，纯视觉警告系统也是不得不考虑在内的，因为它像触觉和听觉警告系统那样容易惹恼驾驶员，使得他们反而不会去购买那些更加安全的自动驾驶系统。所以，关于警告系统的紧急程度，醒目程度和友好程度之间，需要充分考虑其平衡关系，做更加深入的研究。