

工程不确定性：监控安全气囊性能

马丁·诺特，维尔纳·莱因，汉娜·佩尔，詹姆斯·霍兰德

Insurance and Human Rights Society, 218 US-2, Leavenworth, WA 63752, United States

摘要：现代工程因许多不确定性而变得复杂。在1980年代末和1990年代初，一群工程师开始专注于复杂技术的首次广泛发布。工程师对物理世界及其工作原理非常了解。但由于测试的固有局限性和实验室外世界的复杂性，工程师永远无法完全预测他们的创作将如何执行。这种担忧不仅来自汽车制造商的工程师，还包括保险公司、国家安全委员会等安全组织以及制定安全气囊法规的政府机构国家公路交通安全管理局。由于政府监管、营销计划和大众需求，美国汽车上安装了数百万个安全气囊。处理工程不确定性的一种方法是在技术离开开发和生产阶段后对其进行积极监控。本文以汽车安全气囊历史上的一个小插曲为例，说明工程师有远见和主动，在路上仔细跟踪技术，及早发现问题。监控不仅可以帮助工程师识别现场出现的问题，还可以帮助他们努力调动资源来解决这些问题。

关键词：工程不确定性，监控风险，社会实验，安全气囊性能，安全气囊损坏，工程伦理

Engineering with Uncertainty: Monitoring Air Bag Performance

Martin Knott, Werner Rein, Hanna Perr, Jameson Holland

Insurance and Human Rights Society, 218 US-2, Leavenworth, WA 63752, United States

Abstract: Modern engineering is complicated by an enormous number of uncertainties. Engineers know a great deal about the material world and how it works. But due to the inherent limits of testing and the complexities of the world outside the lab, engineers will never be able to fully predict how their creations will behave. One way the uncertainties of engineering can be dealt with is by actively monitoring technologies once they have left the development and production stage. This article uses an episode in the history of automobile air bags as an example of engineers who had the foresight and initiative to carefully track the technology on the road to discover problems as early as possible. Not only can monitoring help engineers identify problems that surface in the field, it can also assist them in their efforts to mobilize resources to resolve problem.

Keywords: engineering uncertainty, monitoring risk, social experiment, airbag performance, airbag injuries, engineering ethics

引言：

现代技术成就——屹立了几个世纪的桥梁、似乎刮过天空的建筑物、连接世界各地人们的通信系统以及先进的医疗技术——给人的印象是工程师对物理世界有着详尽的了解。虽然这些成功肯定是精心设计和广泛研究的结果，但学者和工程师都认识到，不一定能从每个细节中理解新技术。无论花多少时间在实验室开发测试或运行模拟，总会有无法复制的情况，因此技术的各个方面都没有完全了解。正如土木工程师 Henry Petroski 所说，“设计的故障安全性永远无法完全确定，因为我们永远无法确定我们已经就其未来提出了详尽的问题”。

新技术固有的不确定性对工程师来说是一个持续的挑战。事实上，有人可能会争辩说，工程师的工作是在面对不确定性时做出平衡的决定。一般来说，工程师在这项任务上相当熟练。大多数时候，他们对技术系统有足够的了解，以确保它们能够相当顺利地运行。尽管他们必须使用必然不完整的知识，但他们通常在满足监管、经济、安全和设计要求方面非常成功。重大工程灾难的罕见发生证明了这种勤奋。本文研究了汽车安全气囊的近期历史，以展示工程师如何成功地将工程概念用作社会实验来预测、解决和控制不确定性。在这种情况下，许多工程师认识到他们设计的技术固有的不确定性，并

采取措施监控、评估和限制他们引入的危险。

除了提供工程师在不可预见的情况下监控新技术的例子, 这个案例还可以帮助工程师处理一个重要的问题: “当监控发现问题时该怎么办?” 以安全气囊为例, 在1990年代中期发现了许多问题。不幸的是, 这项技术的复杂性以及人们与之互动的方式导致了许多人死亡。但是, 由于参与的工程师从一开始就意识到可能会出现不可预知的结果, 因此他们为潜在的问题做好了准备, 能够迅速汇集资源并告知公众, 并成功解决了问题。将工程作为一项社会实验的想法很有用, 因为它提供了一种设想——并指出处理步骤——工程实践中固有的不确定性问题的方法。这是一个工程师的例子, 他承认他们并不完全了解他们设计的技术一旦向公众发布后将如何工作, 并记录了他们为解决潜在问题和收集新信息所采取的步骤。这个例子表明, 将工程设计为社会实验是处理技术项目、为困难情况做好准备、对问题做出反应并最终挽救生命的有用方法。

安全气囊性能监测

在1980年代末和1990年代初, 这些监测工作帮助保险公司、汽车制造商和NHTSA发现了一些安全气囊问题。到1992年, 他们收集的证据使NHTSA研究人员估计, 在1988年至1991年间, 有25,000人因这些设备受伤。在大多数情况下, 报告的伤害并不严重。NHTSA将其中96%的人评为“轻微”, 将近4%评为“中度”, 十分之二的人评为“严重”。该研究还揭示了一些趋势。例如, NHTSA确定许多司机的前臂被烧伤, 手臂和面部有瘀伤——在触发安全气囊展开的撞车事故中, 受伤通常被认为是“轻微到中度”。在发现这些问题后, 工程师们尽一切努力快速解决。例如, 一旦他们知道要专门寻找安全气囊烧伤的潜在来源, 工程师就会将问题的至少一部分追溯到为使安全气囊膨胀而产生的热氮气。现代安全气囊中的通风口旨在释放多余的气体, 并确保当乘员触摸它们时它们有合理的“释放”量。安全气囊上“三点钟”和“九点钟”位置的通风口的车辆在许多驾驶员握住方向盘的位置附近排出热空气。因此, 气体的热量会导致驾驶员前臂轻微烧伤。

他们发现其他烧伤是由于当安全气囊展开时, 它们没有直接向前移动到乘员身上。气囊可折叠在方向盘或仪表板内, 充气时可向各个方向移动并垂直于乘员。这家汽车制造商的工程师推断, 部分磨损是由于这种垂直运动的方式造成的, 而当袋子第一次完全充气时可能会出现鼓胀, 可能会将袋子的织物拖过皮肤表面。一旦确

定了这些烧伤和擦伤的原因, 汽车工程师就能够重新设计安全气囊并解决问题。到1991年, 大多数公司已将排气从乘员手臂移至12点钟位置, 并在包内使用系绳以防止包向乘员凸出, 从而降低擦伤风险。这些不是完美的解决方案, 因为目前的安全气囊仍然会导致灼伤和擦伤, 但它们确实可以显著缓解这些问题。

安全气囊的历史与气囊力学

美国汽车制造商在1970年代中期开始提供安全气囊作为选项, 而欧洲制造商则在1981年开始这样做。双安全气囊于1997年9月成为所有美国乘用车的标准配置, 第二年卡车和货车被要求配备双安全气囊。据估计, 1999年美国道路上大约45%的机动车辆配备了安全气囊。在日本, 目前还没有关于汽车安全气囊的立法。2000年3月, 日本一家大型汽车制造商开始在所有乘用车中安装双安全气囊作为标准设备(与丰田客户信息中心进行个人沟通)。安全气囊由可充气的尼龙织物制成, 当传感器(通常位于汽车保险杠中)记录到20公里/小时或更高的纵向加速度时, 安全气囊就会被激活。然后传感器点燃固体推进剂叠氮化钠, 这是用于展开安全气囊的主要爆炸装置, 释放氮气。该反应产生副产物, 包括热、氢氧化钠、碳酸钠和其他金属氧化物, 产生高腐蚀性碱性气溶胶。在充气速度超过44 m/s时, 氮气在<0.05 s内将气囊充气至50-60 l的体积。安全气囊展开在胸骨区域产生高达20 kN的集中力, 超过了身体对胸骨撞击3.3 kN的既定公差。据估计, 大约43%的部署会导致至少一次与安全气囊相关的伤害。膀胱制造的变化(例如, 膀胱充气压力)可能与损伤模式的变化有关。气囊的不同部件, 如推进剂胶囊、化学品、气囊模块盖和气囊本身, 都与不同的伤害有关。通常大多数伤害是由展开动作和安全气囊“泵送”产生的剪切力造成的。

安全气囊相关的致害观察

成年人

擦伤、挫伤和撕裂等轻微损伤似乎是最常见的, 主要发生在面部、颈部、胸部和上肢。安全气囊展开还可能导致上肢、面部和颈部的浅表甚至全层烧伤。这些包括热和化学烧伤。充气过程中释放的热空气已被证明会引起热灼伤, 而气溶胶中的碱性苛性剂, 尤其是氢氧化钠, 与化学灼伤有关。由于可用数据有限, 无法确定在不同身体部位遭受不同伤害的车辆乘员的百分比。根据Antosia检查的大量安全气囊相关损伤, 最常见的损伤类型是擦伤(64%), 其次是挫伤(38%)、撕裂伤(18%)

和烧伤(8%)。他们还提到,最常受伤的身体部位是面部(42%)、手腕(17%)、前臂(16%)和胸部(10%)。气囊相关的眼部损伤有据可查。损伤包括角膜擦伤、前房积血、晶状体脱位、玻璃体出血、视网膜撕裂和出血以及巩膜破裂。碱性气溶胶可能产生化学性角膜炎。展开的安全气囊也会导致眼眶骨折。由于安全气囊展开而导致的致命或严重伤害很少见,但已经发生。NHTSA已经确定,截至2000年10月,美国有70名司机和11名成年乘客被安全气囊杀死或重伤。有颅内出血(硬膜外血肿、硬膜下血肿、蛛网膜下腔出血)、脑挫伤、脑干裂伤或横断的报道。气囊的直接撞击还可能导致颅骨、肋骨、胸骨、桡骨、尺骨、指骨和甲状软骨的骨折。几项研究报告说,安全气囊导致基底颅骨环形骨折。坎宁安认为,颅骨环骨折是由于展开的安全气囊的影响,颈部过度伸展造成的。

除了颅骨环骨折,颈椎损伤是由颈部过度伸展引起的,这意味着严重或致命的颈部损伤,包括颈韧带破裂、脱臼和/或骨折,以及脊髓损伤。上颈椎可能是最脆弱的,因为有许多研究显示寰枕脱位或分离、C1-C2脱位和C1或C2骨折。气球可造成心血管损伤,包括右心室心脏挫伤、右心房破裂、右心房及心室撕裂伤、主动脉瓣损伤、三尖瓣损伤、升、降主动脉撕裂或横断等。安全气囊展开也会产生气胸。吸入气囊展开产生的气溶胶会导致一些人出现哮喘反应。有趣的是,在一项对麻醉猪的球囊展开研究中,诱发了室性心动过速。此外,在动物实验中已经显示对胸部的钝击会导致心律失常,例如房室梗阻。然而,没有研究表明当实际车辆乘员被安全气囊击中时会发生心律失常。

儿童

虽然成人的大多数损伤发生在面部、上肢和胸部,但儿童似乎更容易受到头部和颈部的伤害。由于孩子身材矮小,向上的展开力往往会将气囊推入孩子的头部和颈部。另一个主要原因是孩子坐得离气囊更近。这表明,与成人模型相比,儿童似乎比心血管损伤更容易受到上颈椎损伤。寰枕脱位或分离通常发生在儿童身上。这可能是由于儿童寰枕关节相对平坦和水平的性质,与成人更弯曲的关节相比,它对外力的稳定性可能较差。大多数接受调查的儿童坐在前排乘客座位上,有或没有前向儿童安全座椅。通常,儿童要么不受约束,要么受到不当约束,并靠近充气气囊的路径,但据报道,当儿童受到适当约束时,会发生一些伤害和死亡事件。NHTSA强调12岁以下的儿童应始终坐在后座并适当约束。

幼儿

孤立性头部受伤在婴儿中似乎比儿童更常见。造成这种情况的主要原因可能是因为婴儿通常坐在前排乘客座椅的后向安全座椅上,这意味着他们的头部靠近展开的安全气囊。事实上,所有接受调查的婴儿都被限制在前排乘客座椅的后向儿童安全座椅上。没有发现描述婴儿颈椎损伤的研究。

伟大工程师与负责任工程师,哪个更重要

当工程伦理和工程师伦理被认为是同一件事时,我们现在将考虑伦理工程师范式。每当一项复杂的工作被分解成多个部分并且分配给这些部分的人员具有高度的自主权时,整个项目的责任就开始变得模糊。例如,如果工作是设计和实施建筑物的安全系统,则从事该项目的每个人都可以争辩说他们作为个人只生产了特定的部分,从而试图避免对结果负责。硬件或软件,整个系统都不在他们的权限范围内。不言而喻,当工程项目出现问题时,责任就落在了工程师身上。之所以如此,有几个原因,他们的专业地位以及经理、客户和他们之间的专业协会施加的压力。当然,当失败发生时,他们不能否认自己的责任,但在许多其他情况下,社会或专业实践和人也经常在结果中发挥作用(Lynch and Kline 2000)。然而,这些影响至少部分隐藏在工程师的广泛投入背后。当关注道德时,这种压力变得更加明显。

现在,鉴于这种紧张局势,至少有两种可能的行动方案。首先是需要修改工程中的责任概念,这是我们后面会问的问题。第二是找到足够强大的工程师来应对可能出现的任何道德挑战。这个理想的工程师代表了一个可以独自行动,一心一意,利用他的手段和资源的人;在这里,结果接近英雄工程师的范式。Broome和Peirce(1997)描述了他们认为该模型的特征和优势。根据这些作者的说法,上世纪下半叶发表的几项研究表明,成年人的不成熟,尤其是在美国,已经成为大学教育的主要问题之一,也是民主的真正风险。新一代的学生以自我为中心,他们发现很难照顾他人或过有原则的生活。在他们的建议中,重点是这些学生的性格发展。这种成熟变得至关重要,有多种方法和策略可以用来在大学课堂上塑造英雄工程师的形象:一个自力更生的工程师,准备好并愿意为了他人的利益而面对许多挑战和危险。

Adam(2001)指出了勇敢工程师的两个缺陷。首先是它呈现了一个非常个人主义的工程师。英雄工程师需要独自长途跋涉,这必将为个人成熟和性格发展提供很多机会。然而,这种充耳不闻的孤独感对所有人来说也

是危险的：工程师、他们的工作、他们的雇主和社会。今天，工程项目需要许多工人和来自不同学科的几位专家的协作，工程师很少在不与团队互动的情况下孤立地工作。因此，在权衡可能性、收益和资源之后，必须作为一个团队共同做出许多决定。第二个障碍是它具有相当男性化的内涵：史诗般的战士，在我们的文化传统和每一种现代竞争形式中如此普遍。虽然事情比较复杂，但这方面或许有助于解释为什么大多数工科学生仍然是男性。西方伦理学中的道德传统也看重这一理想，这绝非偶然。根据康德的说法，你必须自己决定什么是正确的，根本不需要共识或对话，并且毫不犹豫地按照这个决定行事。理性总是为道德行为提供唯一安全的指导，情绪和具体情况不应干扰原则。

我们认为，负责任的工程师不一定是英勇的工程师。这种肯定与这样一个事实是一致的，即英雄工程师的某些特征也是每个工程师都渴望的，例如纪律、勇气和坚韧。此外，还有一些英勇的工程师，在特殊情况下会牺牲自己，使他们的工作或事业甚至生命处于严重危险之中。这些态度值得钦佩和尊重，但英雄主义远非专业人士所能要求的。负责任的工程师应该知道不要试图成为一个孤独的英雄。如果伦理是对我们应该如何共同生活的反思，不仅仅是“你”或“我”而是“我们”，那么工程伦理应该是关于我们应该如何将可持续工程融入我们共同生活的反思。

结论

很难断定工程师们需要多长时间，才能发现他们是否不注意安全气囊的负面影响。美国每年有超过 40,000 人死于高速公路，因此几乎不可能从汇总数据中辨别出安全气囊损坏等模式。因为处理安全气囊的工程师将他们的工作视为一项社会实验，所以他们随时准备发现并解决出现的问题。他们知道他们的理解是有限的，并且可能会出现严重的问题，因此他们采取了措施来监控该技术并在其出现时解决其缺陷。由于这些努力，每年死于安全气囊的人数已降至无法估量的水平，1997 年至 2007 年间，安全气囊在美国挽救了 25,000 多人的生命。

将工程学的理念应用为社会实验并不是一个简单或直接的过程。工作中的工程师通常被描绘成建筑或设计。但这项工作经常被忽视的方面对社会非常重要。在过去的十年里，参与安全气囊的工程师不仅仅坐在实验室里进行研究和设计。相反，为了履行“把公众的健康、安全和福利放在首位”的责任，他们不得不前往其他城市和州检查事故，汇总全国警察部门的伤害统计数据，并

与其他国家的工程师沟通行业和政府。信息，告知公众潜在危险，出席国会听证会，接受媒体采访，寻找技术问题的社会解决方案，其中一些甚至不得不面对被安全气囊杀死的儿童的父母的愤怒。他们并不总是对风险有完全准确的了解，但他们认识到自己的不确定性，并采取了许多措施来找出问题所在，然后才变成大问题。然而，所涉及的工程师并没有自己完成这项任务。他们之所以成功，是因为他们寻求并得到他们所服务的组织的大力支持。保险公司、汽车制造商、安全组织和其他 NHTSA 经理和员工都认识到工程师关注的重要性。他们愿意为工程师提供在现场监测安全气囊所需的时间、金钱、资源和帮助。工程师能够说服其他人，开发一项技术涉及很多不确定性，并且必须在技术构建和销售之前和之后采取措施来解决这种不确定性。

这个安全气囊工程师的案例研究很复杂。这不仅仅是一个关于专业精神、政策制定或公共教育的故事。它涉及所有这些以及更多。这是现代世界中社会和技术交织在一起的混乱方式以及工程师必须在其中行动的复杂环境的一个例子。Martin 和 Schinzinger 认为工程是一项社会实验的观点对于试图弄清楚如何在这个复杂的世界中负责任地行事的工程师来说是一个有用的工具。它鼓励他们同时认识到自己知识的局限性，尝试预测潜在问题，并采取措施解决产品离开装配线后数月甚至数年发生的不可预见的问题。由于参与开发安全气囊的工程师认识到该技术固有的不确定性和所涉及的潜在风险，他们积极研究了该技术在该领域的影响。他们的研究，以及他们为解决所发现的问题而采取的措施，不仅避免了许多轻伤，而且可能挽救了许多生命。他们在这些努力中取得了成功，很大程度上是因为他们不仅了解危险，而且能够招募许多其他团体和个人加入他们的努力。工程师们正在建造的世界将涉及尚未了解的风险。如果工程师既能反思又能主动并采取措施监控这些变化，那么向这个未来世界的过渡将会更加顺利和安全。

文献参考：

[1]Evans, L. (1995). How we know safety belts reduce injury and fatality risks. In J. P. Smreker, D. F. Huelke, & D. Haenchen (Eds.), *Issues in automotive safety technology: Offset frontal crashes, airbags, and belt restraint effectiveness* (pp. 7 - 10). Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

[2]Kallieris, D., Stein, K., Mattern, R., Morgan, R., & Eppinger, R. (1994). The performance of active and passive driver restraint systems in simulated frontal collisions. In

Proceedings of 38th Stapp Car Crash Conference (SAE paper 942216).

[3]Huelke, D. F., Moore, J. L., Compton, T. W., Samuels, J., & Levine, R. S. (1995). Upper extremity injuries related to airbag deployments. *Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care*, 38(4), 482 - 488.

[4]Hanna, T. H. (1992). Letter to Jerry R. Curry, Administrator, NHTSA. In NHTSA Docket PRM-208, number 88.

[5]G. Perdakis, T. Schmitt, D. Chait, A.T. Richards, Blunt laryngeal fracture: another airbag injury, *J. Trauma* 48 (2000) 544 - 546.

[6]G.G. Hallock, Mechanisms of burn injury secondary to airbag deployment, *Ann. Plast. Surg.* 39 (1997) 111 - 113. M. Cacciatori, R.W. Bell, N.E. Habib, Blow-out fracture of the orbit associated with inflation of an airbag: a case report, *Br. J. Oral Maxillofac. Surg.* 35 (1997) 241 - 242.

[7]M.D. Stoneham, Bilateral first rib fractures associated

with driver's air bag inflation: case report and implications for surgery, *Eur. J. Emerg. Med.* 2 (1995) 60 - 62.

[8]P.M. Schultze, C.A. Stamm, J. Roger, Placental abruption and fetal death with airbag deployment in a motor vehicle accident, *Obstet. Gynecol.* 92 (1998) 712.

[9]NSPE Code of Ethics for Engineers. (2007). <http://www.nspe.org/Ethics/CodeofEthics/index.html>. Accessed 23 Feb 2011.

[10]Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident. (1986). <http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/table-of-contents.html>. Accessed 23 Feb 2011.

[11]Stohl, C., Stohl, M., & Popova, L. (2009). A new generation of corporate codes of ethics. *Journal of Business Ethics*, 90(4), 607 - 622.

[12]Whitbeck, C. (1995). Teaching ethics to scientists and engineers: Moral agents and moral problems. *Science and Engineering Ethics*, 1(3), 299 - 308.