

# 量子技术、和平与安全：入门指南

Zhanna L. Malekos Smith 和 Giacomo Persi Paoli

## 致谢

联合国裁军研究所（裁研所）核心资助方提供的支持是其从事一切活动的基础。本出版物由欧盟资助，是联合国裁军研究所安全与技术项目的一部分。该项目还得到了捷克、法国、德国、意大利、荷兰、挪威和瑞士政府以及微软公司的支持。

特别感谢加州大学伯克利分校的欧文·拉乔（Irving Lachow）博士和安德鲁·雷迪（Andrew Reddie）教授，以及美国西点军校（美国陆军学院）勤勉的研究助理团队：中尉克里斯蒂娜·黄（Christina Huynh），以及学员杰森·英格索尔（Jason Ingersoll）、克里斯托弗·T·科宁（Christopher T. Konin）、康纳·R·莱吉特（Conner R. Leggett）和莱利·霍耶斯（Riley Hoyes）。

## 关于联合国裁军研究所

联合国裁军研究所是由自愿捐款资助的联合国系统独立机构。作为全球少数以裁军为重点的政策研究机构之一，裁研所在裁军与安全问题方面产生知识并促进对话和行动。裁研所总部设在日内瓦，协助国际社会发展实际和创新观点，以找到应对重大安全问题的解决方法。

## 注

本出版物使用的名称及材料的编制方式并不意味着联合国秘书处对任何国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位，或对其边界或界限的划分表示任何意见。本出版物中表达的观点仅为作者个人意见，不一定反映联合国、裁研所、欧盟及其工作人员或资助方的观点或意见。

## 引用

Malekos Smith, Zhanna L. 和 Persi Paoli, Giacomo。《量子技术、和平与安全：入门指南》。瑞士日内瓦：联合国裁军研究所，2024 年。

## 作者简介



**Zhanna L. Malekos Smith** 法律博士是联合国裁军研究所的非驻地研究员和联合国训练研究所（UNITAR）的国际法教授。此外，她还担任美国华盛顿战略与国际研究中心（CSIS）航空航天安全项目和战略技术项目的高级研究员，卡内基国际事务伦理委员会访问研究员，以及美国西点军校陆军网络研究所的研究员。此前，Malekos Smith 曾任西点军校系统工程系助理教授以及美国空军战争学院网络战研究教授。她曾是美国空军军法署上尉及律师，在麻省理工学院后备军官训练团（ROTC）项目中获得委任。本文仅代表作者个人观点，并不反映联合国、美国政府或美国国防部的意见。



**Giacomo Persi Paoli** 博士是联合国裁军研究所安全与技术项目负责人。他的专业领域涵盖科学与技术，特别关注新兴技术对安全与国防的影响。在加入裁研所之前，他曾任兰德欧洲公司副主任，负责国防与安全科学、技术与创新项目，以及兰德未来与前瞻研究中心的相关工作。他拥有意大利罗马大学经济学博士学位，以及意大利比萨大学政治学硕士学位。

## 缩略语

<b>AI</b>	人工智能
<b>AWS</b>	自主武器系统
<b>DSS</b>	决策支持系统
<b>GNSS</b>	全球导航卫星系统
<b>ICT</b>	信息和通信技术
<b>ISR</b>	情报、监视和侦察
<b>OEWG</b>	不限成员名额工作组
<b>PQC</b>	后量子密码学
<b>QKD</b>	量子密钥分发
<b>SQUID</b>	超导量子干涉仪

## 目录

致谢.....	1
关于联合国裁军研究所 .....	1
注 .....	1
引用.....	1
作者简介.....	2
缩略语 .....	2
执行摘要.....	4
1. 导言：量子技术的崛起 .....	5
2. 量子力学的基本概念 .....	5
3. 探索量子技术的军事应用 .....	7
3.1 量子传感.....	7
3.2 量子成像.....	8
3.3 量子雷达系统.....	9
3.4 量子通信.....	9
3.5 量子密钥分发.....	9
3.6 量子计算.....	10
4. 量子技术对国际安全的影响.....	10
4.1 全球信息和通信技术安全 .....	10
4.2 量子化情报、监视和侦察 .....	11
4.3 决策支持系统和自主武器系统.....	11
4.4 监测与核查 .....	12
5. 国家和地区量子倡议实例 .....	12
6. 结论 .....	15

## 执行摘要

本入门指南为政策制定者和外交官概述了量子技术及其对国际安全的预期影响，重点介绍了量子技术在军事和民用领域的潜在益处和风险。量子技术的进步将在传感、计算、通信和密码学领域带来变革性变化，不仅能够增强情报、监视和侦察能力，还在信息安全和密码弹性领域实现关键突破。然而，这类技术也可能对支撑全球和平的安全框架构成挑战。

例如，量子传感技术标志着精密测量领域的一次重大飞跃，其应用范围从军事行动延伸至裁军核查。这项技术可以极大提升军备控制所需的监测能力，实现对核材料和其他关键环境标记的高灵敏度检测。量子传感器也在海洋领域展现出潜力，能够探测到此前无法检测的水下目标（如潜艇），对传统海军隐形技术构成战略挑战。

量子计算技术虽然尚处于发展阶段，但预计将在需要高级数据处理的领域（如密码学、复杂模拟和人工智能驱动的自动化）带来革命性变化。随着这项技术的成熟，现有用于保护关键基础设施和敏感通信的密码系统可能面临威胁。这凸显了向后量子密码学标准转型以应对未来网络威胁的紧迫性。

除了信息与通信安全领域，量子传感器和量子计算技术还可能对国际和平与安全产生更广泛的积极或消极影响。例如，量子技术可以支持更精准的核查技术，加强防扩散工作，并提供足够灵敏的远程监测能力，能够从太空探测核活动，进一步扩大国际社会的监视范围。

各国广泛关注推进量子技术发展，既因其可能带来的竞争优势，也因其提升安全的潜力。一些国家已将量子技术发展纳入其国家安全战略，通常会建立公私合作伙伴关系，以加速研究并弥合科学创新与实际应用之间的差距。这些举措凸显了多边合作的必要性，以应对量子能力日益增长的不平衡问题，这种不平衡可能会加剧量子技术领先国家与发展中国家之间存在的数字鸿沟。

展望未来，国家需要建立稳健的治理框架、跨部门伙伴关系，并专注能力建设，以支持具备量子技术的劳动力。多边合作对于建立负责任地使用量子技术的规范、促进稳定而非竞争以及确保量子技术的发展惠及所有国家至关重要。就量子技术采取一种全面的方法，涵盖量子技术的整个生命周期，将有助于各国预测并应对量子技术对国际和平与安全带来的机遇与挑战。

## 1. 引言：量子技术的崛起

量子技术研究、创新和投资的兴起正成为一种全球现象。<sup>1</sup>作为一项技术，它在支持许多可持续发展目标方面具有巨大潜力，能够实现重大突破。<sup>2</sup>

尽管量子技术的益处令人向往，但也引发了对其可能对国际和平与安全带来风险的担忧。2022年，联合国秘书长在大会上警告称，量子计算机可能“破坏网络安全，增加复杂系统发生故障的风险。我们尚未建立应对这一切的全球架构。”<sup>3</sup>

可以肯定的是，量子技术在多大程度上可能影响未来战争或更广泛的安全格局的性质，仍存在很大的不确定性，特别是考虑到量子系统仍处于脆弱和初始阶段。<sup>4</sup>然而，从全球安全的角度来看，量子科学和技术可能使计算领域发生深远变革，使得进行早期教育和知识建设显得尤为重要。

各国对量子技术的兴趣日益浓厚，这体现在对量子技术研究的投资不断增加<sup>5</sup>，以及在联合国信息和通信技术安全和使用问题不限成员名额工作组正式会议期间，会员国频繁提及量子技术。<sup>6</sup>

联合国已将2025年定为“国际量子科学与技术年”，本入门指南旨在提高人们就量子技术对国际安全潜在影响的认识，并为政策制定者和外交官提供一个参考框架，用于审视量子科学与技术所涉及的风险生态系统。

为了帮助读者理清这一复杂主题的脉络，本读物在引言之后的内容安排如下：第二节概述了若干国家和地区关于量子的主要举措；第三节阐述了一些量子力学的基础概念；第四节介绍了量子技术的军事应用；第五节则初步探讨了量子技术对国际安全格局可能带来的影响，最后在第六节中总结全文的主要观点。

## 2. 量子力学的基本概念

量子力学研究的是原子和粒子的行为。原子由质子和中子组成的原子核和围绕原子核的电子构成。电子以离散量子（即能量的最小单位）的形式运动，也可以以连续波的形式运动，就

---

<sup>1</sup> Alina Clasen, 《德国在量子技术竞赛中努力追赶美国和中国》, Euractiv, 2023年5月12日, <https://www.euractiv.com/section/digital/news/germany-strives-catch-up-with-us-china-in-quantum-tech-race/>。

<sup>2</sup> 开放量子研究所, 《2024年进展报告：全民量子倡议》(日内瓦: Gesda, 2024年10月), [https://gesda.global/wp-content/uploads/2024/10/GESDA-Quantum-For-All-Progress-Report-2024\\_Final.pdf](https://gesda.global/wp-content/uploads/2024/10/GESDA-Quantum-For-All-Progress-Report-2024_Final.pdf)。

<sup>3</sup> 联合国, “‘我们的世界正处在大麻烦中’, 秘书长警告大会, 敦促会员国作为一个联合国开展工作”, 新闻稿 SG/SM/21466, 2022年9月20日, <https://press.un.org/en/2022/sgsm21466.doc.htm>。

<sup>4</sup> Lauren Biron, 《QSA 推进量子计算的五种方式》, 伯克利实验室新闻中心, 2023年4月10日, <https://newscenter.lbl.gov/2023/04/10/five-ways-qa-is-advancing-quantum-computing/>。

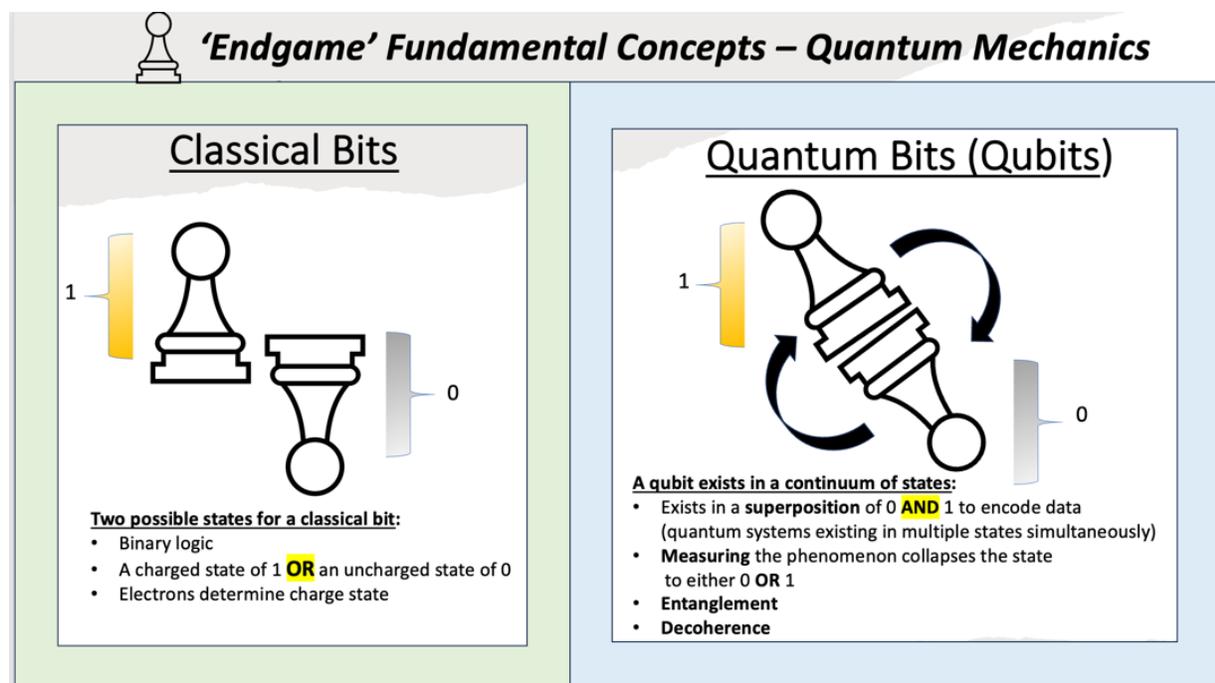
<sup>5</sup> Indra, “ADEQUADE: 用于防御的先进、颠覆性和新兴量子技术”, 2022年, <https://www.indracompany.com/en/indra/adequade-advanced-disruptive-emerging-quantum-technologies-defence>。

<sup>6</sup> 联合国裁军事务厅, “信息和通信技术安全和使用问题不限成员名额工作组”, <https://meetings.unoda.org/open-ended-working-group-on-information-and-communication-technologies-2021>。

像厨房水槽中的水流一样。电子可以同时占据多种状态，这种现象被称为叠加<sup>7</sup>，正因如此，量子力学被一些物理学家认为是“怪异”学科。<sup>8</sup>

在量子层面，事件并不是简单确定的。例如，电荷不是两种离散的状态，即不带电（记为0）和带电（记为1），而是两种状态可以同时存在，且是随机的。著名的双缝实验证明了量子现象的这些独特性质。简而言之，科学家们观察到，当电子波通过两个狭缝时，会产生更小的波，这些波相互增强和抵消，直到撞到测试区的后墙。之所以会出现这种干涉模式，是因为“电子似乎像波一样行动，直到它们被观察到或测量到时，它们才又恢复成粒子”。<sup>9</sup>

图1. 经典比特和量子比特的直观表示



叠加可以用图 1 中棋子的图像来进一步解释。想象一下，棋子既可以竖立放置（表示带电状态为 1），也可以倒立旋转（表示不带电状态 0）。这种二进制逻辑就是现代数字计算机的运行方式。经典比特（信息的基本单位）——或这个例子中的经典棋子——可以代表 0 或 1。相比之下，量子计算机是一种更复杂的系统，它使用不同的信息单位（称为量子比特或量子位）来运行，这些信息单位以 0 和 1 的叠加方式存在，用于编码数据。<sup>10</sup>理论物理学家 Michio Kaku 解释说，图 1 中的量子棋子在旋转过程中可以连续的状态存在——因此，一个原子“包

<sup>7</sup> 同上。

<sup>8</sup> Michio Kaku, 《未来物理学：截至 2100 年，科学将如何塑造人类命运和我们的日常生活》（纽约：Anchor, 2012 年）。

<sup>9</sup> 阿米特·卡特瓦拉, 《量子计算：工作原理及其如何改变世界》（伦敦：Random House Business Books, 2021 年），第 16 页。

<sup>10</sup> IBM, “IBM Quantum Learning”, n.d., <https://learning.quantum.ibm.com/>。

含的信息量远远超过 0 或 1”。<sup>11</sup>在专门的显微镜下观察，量子比特就像“银色的加号”。<sup>12</sup>与数字计算机相比，量子计算机能够更高效地执行复杂的建模任务和解决多变量问题。<sup>13</sup>

此外，量子比特还能与其他量子比特相互作用，这种现象被称为纠缠。纠缠是指“量子系统中的两个或多个对象可以内在彼此关联，以至于对一个对象的测量决定另一个对象可能的测量结果，无论这些对象之间的距离有多远”。<sup>14</sup>这一特性使量子系统能够同时进行多项计算。<sup>15</sup>然而，量子态对声音、运动和温度变化等环境干扰非常敏感。

科学家们正在探索如何利用叠加来提高量子计算机的计算能力和速度。在开发和部署量子技术的诸多挑战中，如何确保高灵敏度的量子不受频率测量中的退相干或不确定性的影响是其中之一，<sup>16</sup>原因在于，即使是测量量子系统的行为也可能改变结果的完整性，使其坍缩为 0 或 1 的二进制形式。<sup>17</sup>这些环境干扰会导致萎缩（即退相干），从而使量子系统难以维持较长时间的叠加和纠缠以进行实验。

### 3. 探索量子技术的军事应用

第二节所述量子力学的基本特性使我们能够探索多种军事或安全应用。事实上，量子技术有可能在计算、通信和态势感知方面提供现有技术无法比拟的能力。<sup>18</sup>

本节将介绍学术界和更广泛的文献中最常提及的应用：量子传感、量子成像、量子雷达系统、量子通信、量子密钥分发和量子计算。

#### 3.1 量子传感

从本质上说，量子传感器是一种测量工具。虽然制造量子传感器的物理原理和材料与传统传感器相同，但前者具有超高灵敏度。例如，其能够感知电场和磁场中最轻微的环境干扰以及辐射的存在。然而，量子传感器与传统传感器的主要区别在于，量子传感器具有非凡的精确能力，能够探测到最小的能量或测量单位，即量子。<sup>19</sup>

鉴于量子传感器能够精准探测时间和重力等微小变化，科学家们正在探索如何应用这种技术，为当前的军事传感能力提供优势，以达到防御和进攻的目的。例如，在全球导航卫星系统

---

<sup>11</sup> 卡库，《未来物理学》。

<sup>12</sup> Katwala，《量子计算》，第 45 页。

<sup>13</sup> Lily Chen 等人，《后量子密码学报告》（华盛顿特区：国家标准与技术研究院，2016 年 4 月），<https://doi.org/10.6028/nist.ir.8105>。

<sup>14</sup> 美国国家科学、工程和医学院，《量子计算：进展与前景》（华盛顿特区：国家科学院出版社，2019 年），<https://doi.org/10.17226/25196>，第 26 页。

<sup>15</sup> Alexandre Menard 等人，《量子计算策略》，麦肯锡公司，2020 年 2 月 6 日，<https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/a-game-plan-for-quantum-computing>。

<sup>16</sup> Adrian Cho，“A Quantum Sense for Dark Matter”，《科学》，2022 年 4 月 28 日，<https://www.science.org/content/article/crack-mystery-dark-matter-physicists-turn-super-sensitive-quantum-sensors>。

<sup>17</sup> 同上。

<sup>18</sup> 北大西洋公约组织（北约），“北约量子技术战略摘要”，2024 年 1 月 17 日，[https://www.nato.int/cps/en/natohq/official\\_texts\\_221777.htm](https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm)。

<sup>19</sup> David Chandler，《量子传感器可检测任何频率的电磁信号》，麻省理工学院新闻，麻省理工学院，2022 年 6 月 21 日，<https://news.mit.edu/2022/quantum-sensor-frequency-0621>。

（GNSS）受到电子干扰（如信号干扰和欺骗）的环境中，量子传感器可以帮助军队维持时间和定位的准确性。<sup>20</sup>

2017年，中国科学院宣布其已开发出一种名为超导量子干涉仪的传感器，它依靠量子传感器来探测超灵敏的环境变化（例如大脑活动中的微弱磁场）。超导量子干涉仪灵敏度极高，可以记录外太空的远程活动（如太阳耀斑）。此外，作为国防的一部分，超导量子干涉仪还能探测飞机，并通过增强磁异常探测为反潜机提供支持。中国研究人员还在开发各种类型的磁探测器，其中一些可安装在卫星上，<sup>21</sup>可在飞机上运行以精准定位地表下的矿物。<sup>22</sup>

此外，量子传感器正在成为增强水下潜艇探测能力的一项有前景的技术。无论是基于卫星的系统、固定的水下系统，还是飞机或舰船安装的系统，未来的量子传感器可能对潜艇行动的隐形性产生颠覆性影响，包括对弹道导弹核潜艇的探测，而弹道导弹核潜艇是核威慑的关键资产。尤其是：

- **量子磁强计**可用于探测潜艇金属船体或推进系统引起的磁场微小变化。这将大大扩展对水下潜艇的探测范围。
- **量子重力仪**可以测量引力的最小变化，从而揭示潜艇质量的存在。量子重力仪有可能在潜艇没有任何屏蔽方法的情况下探测到其存在。<sup>23</sup>

### 3.2 量子成像

量子成像是一种专门的成像方法，使科学家能够捕捉物体的高质量光学图像。<sup>24</sup>这种方法利用纠缠光粒子来创建原本高度敏感和不可观测波长的详细图像。<sup>25</sup>通过操纵光子对，科学家可以捕捉到比传统方法更高质量的图像分辨率。<sup>26</sup>

在军事行动中，可以开发先进的红外成像能力，以增强情报、监视和侦察能力。例如，量子成像系统可用于感知战场环境中有害有毒气体的存在，并协助对化学武器和塑料成分进行法证分析。<sup>27</sup>此外，量子技术还能实现所谓的“鬼成像”，这种技术利用光子之间的量子相关性，在不直接“看到”物体的情况下创建物体图像，从而有可能透过云、雾或烟等遮蔽物对目标

---

<sup>20</sup> 美国国防部国防科学委员会（DSB），《DSB 报告》，n.d.，<https://dsb.cto.mil/reports.htm>。

<sup>21</sup> Henk H.F. Smid, “中国遥感卫星分析”，《太空评论》，2022年9月26日，<https://www.thespacereview.com/article/4453/1>。

<sup>22</sup> Stephen Chen, “中国研制出世界上最强大的潜艇探测器了吗？”，《南华早报》，2017年6月24日，<https://www.scmp.com/news/china/society/article/2099640/has-china-developed-worlds-most-powerful-submarine-detector>。

<sup>23</sup> Rudy Ruitenber, 《装备量子传感器，法国期待电子战的飞跃》，《防务新闻》，2024年6月25日，<https://www.defensenews.com/global/europe/2024/06/25/armed-with-quantum-sensors-france-eyes-leaps-in-electronic-warfare/>。

<sup>24</sup> “量子成像”，《自然》，n.d.，<https://www.nature.com/collections/gehjgebjcc>。

<sup>25</sup> 弗劳恩霍夫协会，“量子成像：突破光学的边界”，Phys.org，2022年1月3日，<https://phys.org/news/2022-01-quantum-imaging-boundaries-optics.html>。

<sup>26</sup> 同上。

<sup>27</sup> 同上。

进行成像。这对军事侦察和目标定位具有重要价值，<sup>28</sup>类似的概念还能极大改善极端弱光条件下的成像效果，而这正是成功开展情报、监视和侦察行动的另一重要条件。<sup>29</sup>

### 3.3 量子雷达系统

传统雷达系统会受到雷达干扰装置和自然现象的噪声干扰。相比之下，具有弹性的量子雷达系统通过利用更复杂的光子中继系统，能够更精确地探测隐形飞机。<sup>30</sup>

一些学者认为，量子雷达在军事行动中的潜在影响不应受到质疑，因为一旦该技术进入实施阶段，它将标志着“隐形时代的终结”。<sup>31</sup>相反，另一些专家则认为，量子雷达“仍然面临巨大的工程挑战”，从构建灵敏的探测器到找到稳定纠缠光子流的方法，不一而足。<sup>32</sup>总之，理论界对量子雷达技术在军事行动中的附加值存在激烈争论。

关于太空行动，一些学者假设，量子雷达可用于外太空探测隐形航天器，跟踪微小但有害的轨道碎片的移动，以及监测弹道导弹。<sup>33</sup>其他学者则对物体探测能力的提升程度持怀疑态度。<sup>34</sup>

总体而言，量子传感、成像和雷达技术有可能为军队提供 stronger 的态势感知能力，同时也有可能某些情况下削弱军队的隐形能力。<sup>35</sup>

### 3.4 量子通信

在本入门指南介绍的所有量子技术类别中，量子通信是目前在军事应用方面发展最少的。量子通信利用纠缠——量子比特可以同时相互通信的过程——在不同的传输通道和地点传输数据。<sup>36</sup>

量子通信尚处于起步阶段，而量子密钥分发领域在军事应用方面已稍有发展。

### 3.5 量子密钥分发

在军事领域，通信安全对于确保有效指挥和控制以及成功完成任务至关重要。在这方面，数据和信息加密在军事领域一直发挥着重要作用。量子密钥分发利用量子力学原理对数据进行

---

<sup>28</sup> Rajesh Uppal, 《量子成像技术可应用于军事领域，中美竞相在卫星中部署量子幽灵成像技术用于隐形飞机追踪》，IDST, 2022年6月26日, <https://idstch.com/technology/photonics/revolutionary-new-quantum-imaging-technique-can-have-military-applications/>。

<sup>29</sup> 国家安全技术加速器 (NSTXL), “军事中的量子技术”, 2023年2月1日, <https://nstxl.org/quantum-technology-in-the-military/>。

<sup>30</sup> 马丁·贾尔斯: 《美中量子军备竞赛将改变战争》, 《麻省理工科技评论》, 2019年1月3日, <https://www.technologyreview.com/2019/01/03/137969/us-china-quantum-arms-race/>。

<sup>31</sup> 例如, 见同上引述的麻省理工学院的 Seth Lloyd 教授。

<sup>32</sup> 例如, 见同上引述的滑铁卢大学乔纳森·鲍教授。

<sup>33</sup> Chris Jay Hoofnagle 和 Simson Garfinkel, 《量子传感器--不同于量子计算机--已经出现》, Defense One, 2022年6月27日, <https://www.defenseone.com/ideas/2022/06/quantum-sensorsunlike-quantum-computersare-already-here/368634/>。

<sup>34</sup> 美国国防部国防科学委员会 (DSB), 《DSB 报告》。

<sup>35</sup> Hoofnagle 和 Garfinkel, “量子传感器——不同于量子计算机——已经出现”。

<sup>36</sup> 美国国家科学基金会 (NSF), “NSF 与白宫科技政策办公室合作开发量子教育关键资源”, 2020年5月18日, [https://www.nsf.gov/news/special\\_reports/announcements/051820.jsp](https://www.nsf.gov/news/special_reports/announcements/051820.jsp)。

加密。在物理领域，密钥用于锁定和解锁系统。在计算领域，密钥可以一串 1 和 0 表示，用于加密和解密信息。

2017 年，中国在量子卫星“墨子号”与河北省量子通信地面站之间成功实现了首次洲际地对星和星对地量子密钥分发通信组网。<sup>37</sup>据“墨子号”系统指挥官介绍，这种量子通信网络是“最安全的通信方式，因为任何窃听者都会破坏纠缠并被探测到”。<sup>38</sup>这次测试意义重大，因为它证明了空间中的量子安全通信是可行的。此外，《北约评论》的一篇文章认为，在军事防御通信中，量子密钥分发有可能被用来实现“超安全数据通信，甚至有可能完全无法破解”。<sup>39</sup>

### 3.6 量子计算

量子计算是一种先进的计算形式，它利用量子物理学原理处理信息。这有可能解决普通计算机需要数千年才能解决的问题。因此，量子计算是一种赋能技术，在包括军事领域在内的社会各个领域都具有巨大潜力。主要的军事应用包括：<sup>40</sup>

- **密码学和网络安全**，包括破译密码和抗量子加密（见第四节）
- **人工智能（AI）和机器学习**，支持卓越的决策支持系统（DSS）和新一代自主系统
- **物流和复杂优化问题**，如供应链管理和任务规划
- **模拟和建模**，为军事训练提供更精确、更复杂的战场条件模拟
- **材料科学**，加速发现和开发用于军事用途的新材料，如更坚固、更轻便的装甲

## 4. 量子技术对国际安全的影响

在前几节简要概述了量子技术及其潜在军事用途之后，本节将首次高度概述量子技术在以下四个关键领域可能对国际安全产生的影响：全球信息和通信技术安全、情报、监视和侦察、决策支持系统和自主武器系统，以及监测与核查。

### 4.1 全球信息和通信技术安全

如引言所述，越来越多参与信息和通信技术安全问题不限成员名额工作组的会员国强调了量子技术带来的潜在威胁。这些威胁在实践中将会如何表现呢？

例如，量子计算机可以破解许多当前的加密方法，包括广泛使用的公钥加密系统（如 RSA 和 ECC）。这将威胁到国内和国家间敏感政府、军事和情报通信的安全。这种能力还能使恶意行为者解密以前截获和存储的加密通信。在这种恶意信息和通信技术行为中，即所谓的“先收获，后解密”（HNDL），加密数据在今天被外泄和存储，然后在未来使用后量子密

---

<sup>37</sup> “中国实现量子跳跃”，《中国日报》，2017 年 6 月 18 日，<http://en.people.cn/n3/2017/0618/c90000-9229972.html>。

<sup>38</sup> 同上。

<sup>39</sup> Michiel van Amerongen，《国防与安全中的量子技术》，《北约评论》，2021 年 6 月 3 日，<https://www.nato.int/docu/review/articles/2021/06/03/quantum-technologies-in-defence-security/index.html>。

<sup>40</sup> 国家安全技术加速器（NSTXL），“军事中的量子技术”。

码学算法进行解密。<sup>41</sup>这种情况令人担忧，因为这些安全协议确保基于互联网的日常通信和操作安全，包括金融和医疗保健等关键服务的安全。<sup>42</sup>虽然目前还没有量子计算机配备足够的量子比特来快速计算解密敏感通信所需的质因数，<sup>43</sup>但政策制定者不应陷入对这一日益增长的网络安全风险麻木。<sup>44</sup>

各国应开始规划如何将敏感系统更新为后量子密码学算法，以便更好地保护它们免受后量子密码学风险环境的影响。然而，将关键基础设施过渡到后量子密码学标准是一项复杂的挑战，需要时间、投资以及公共和私营部门之间的良好合作。作为初步规划框架，政策制定者应重点考虑这些因素，并与利益攸关方合作，围绕升级脆弱系统和基础设施建立信任。

## 4.2 量子化情报、监视和侦察

量子传感器正在快速发展。一些技术专家认为，量子传感器将比量子计算更快地从实验室转化到实际应用中。<sup>45</sup>

量子传感器首先需要实现规模化，然后才能部署到军事作战环境中。<sup>46</sup>量子传感器可以增强情报、监视和侦查能力（如第 3.1 节所述），特别是重新定义所有环境下的隐形作战概念。至少在理论层面上，这可能会对国际安全与稳定产生级联影响，因为量子传感器有可能彻底改变军事行动的规划和实施以及核威慑（例如，第 3.1 节提及通过量子传感器对潜艇探测的影响）。

## 4.3 决策支持系统和自主武器系统

量子系统还具有加速先进人工智能和机器学习能力研究的潜力，从而能够开启新一代复杂的人工智能系统，以支持更先进的决策支持系统和新一代自主系统（包括自主武器系统）。例如，增强的计算能力和利用量子算法运行人工智能模型的能力将使人类或自主系统能够更好、更快地做出实时决策，并能够解决传统计算机通常难以解决的复杂优化问题。

为了更好地理解这一创新的意义，2019 年，谷歌的量子计算机就能在短短 200 秒内完成一项传统计算机需要花费 1 万年才能完成的任务。<sup>47</sup>这种能力对于涉及众多变量和潜在结果的军事行动至关重要。除了提供更强的实时数据处理能力外，量子计算与人工智能的融合还将使军事规划人员能够更高效地模拟各种场景和结果，从而做出更明智的决策。

---

<sup>41</sup> 美国国家标准与技术研究院信息技术实验室计算机安全部，《后量子密码学》，n.d.，<https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>。

<sup>42</sup> 同上。

<sup>43</sup> QuTech Academy，《秀尔算法》，n.d.，<https://www.qutube.nl/quantum-algorithms/shors-algorithm>。

<sup>44</sup> Menard 等人，《量子计算策略》。

<sup>45</sup> Marco Lanzagorta 和 Jeffrey Uhlmann，“量子雷达的机遇与挑战”，《电气和电子工程师学会航空航天与电子系统杂志》，第 35 卷，第 11 期（2020 年 11 月 1 日）：38-56，<https://doi.org/10.1109/maes.2020.3004053>。

<sup>46</sup> Marcus Doherty，《量子技术：防御要务》，澳大利亚陆军研究中心，2020 年 5 月 5 日，<https://researchcentre.army.gov.au/library/land-power-forum/quantum-technology-defence-imperative>。

<sup>47</sup> Cameron Wood 和 Alex Krijger，“人工智能与量子计算的融合：解开复杂的地缘政治联系”，转型论坛，2023 年 6 月 18 日，<https://www.transformationforums.com/the-convergence-of-artificial-intelligence-and-quantum-computing-unravelling-the-complex-geopolitical-nexus/>。

在医疗保健、水资源管理和食品安全等领域，量子技术已经在效率、生产力、准确性和速度方面展现出良好的效果。因此，在讨论负责任地开发、部署和使用军事领域的人工智能时，也必须考虑到量子技术的潜在影响。<sup>48</sup>

#### 4.4 监测与核查

量子技术在国际安全领域的最后一个重要应用领域是支持不扩散和保障措施的监测和核查。这些是确保和平利用核技术和防止核武器扩散的关键组成部分。量子传感器正在成为以不同方式加强以下努力的有前景的工具：

- **增强探测能力：**量子传感器在探测核材料和核活动方面有显著提升。特别是它们提高了辐射探测的灵敏度和范围。<sup>49</sup>因此，它们能更有效地监测核设施和边境，防止核材料的贩运。
- **加强环境采样：**量子传感技术可加强用于保障目的收集的环境样本的分析。这为更精确地检测核材料痕量提供了可能。<sup>50</sup>
- **改进核查技术：**先进的量子传感技术可以对核材料的数量和成分进行更精确的非破坏性测量。这种测量对于核查申报和检测转用情况至关重要。<sup>51</sup>
- **增强远程监测能力：**未来部署在卫星上的量子传感器有可能以前所未有的灵敏度从太空探测核活动，从而增强全球监测能力。

### 5. 国家和地区量子倡议实例

一些国家已经投资或宣布投资量子技术。许多国家还利用结构化的公私合作伙伴关系，与从初创企业到大型科技公司等私营部门的参与者合作。<sup>52</sup>

例如，根据其《2023 年量子技术概念框架计划》，德国希望引领全球量子创新竞赛。<sup>53</sup>该文件提出了德国的战略框架，并计划投资 30 亿欧元，在 2026 年前开发通用量子计算机。加拿大也根据其《2023 年国家量子战略》，设想占据中心位置，并已拨款 3.6 亿加元用于推进量子研究、创新和商业化。<sup>54</sup>

---

<sup>48</sup> 开放量子研究所，《可持续发展目标量子外交情报报告》（日内瓦：Gesda，2024 年 10 月），[https://open-quantum-institute.cern/wp-content/uploads/2024/10/GESDA\\_OQI\\_Intelligence-Report-2024\\_Final.pdf](https://open-quantum-institute.cern/wp-content/uploads/2024/10/GESDA_OQI_Intelligence-Report-2024_Final.pdf)。

<sup>49</sup> Samanvya Hooda，“量子传感器与潜艇无懈可击性”，2023 年 10 月 16 日，<https://www.9dashline.com/article/quantum-sensors-and-submarine-invulnerability>。

<sup>50</sup> Henning Soller 和 Niko Mohr，“量子传感尚未开发的潜力：给领导者的启示”，2024 年 9 月 17 日，<https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-sensings-untapped-potential-insights-for-leaders>。

<sup>51</sup> 同上。

<sup>52</sup> 例如，见 IBM，“IBM 与魁北克政府启动开创性合作，利用加拿大首个 IBM 系统加速发现”，2022 年 2 月 3 日，<https://newsroom.ibm.com/2022-02-03-IBM-and-Government-of-Quebec-Launch-Groundbreaking-Partnership-to-Accelerate-Discovery-with-First-IBM-Quantum-System-in-Canada>。

<sup>53</sup> 联邦教育与研究部，《量子技术概念框架联邦政府计划》，2023 年 4 月，[https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Quantum-Technologies-Conceptual-Framework-2023\\_english\\_bf\\_C1.pdf](https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Quantum-Technologies-Conceptual-Framework-2023_english_bf_C1.pdf)。

<sup>54</sup> 加拿大政府，《加拿大国家量子战略概述》，2023 年 7 月 31 日，<https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/en>。

2023 年，澳大利亚政府发布了《国家量子战略》，并承诺投入 10 亿澳元用于加速量子创新。<sup>55</sup>据估计，中国在量子技术方面的投资高达 150 亿美元，有可能超过世界其他国家的投资总和。<sup>56</sup>与这一数字形成鲜明对比的是，欧盟计划到 2025 年在量子计算项目上投资 72 亿美元（68 亿欧元）<sup>57</sup>，美国则承诺到 2025 年投入 19 亿美元。<sup>58</sup>此外，俄罗斯联邦承诺在 2025 年前投资 8 亿美元开发量子技术，并通过了为期五年的俄罗斯量子技术路线图。<sup>59</sup>

在欧洲，欧洲高性能计算联合企业（EuroHPC JU）已宣布计划投资 1 亿欧元用于在捷克、德国、西班牙、法国、意大利和波兰建造六个欧洲量子计算机站点。<sup>60</sup>另一个例子是欧盟委员会的“用于防御的先进、颠覆性和新兴量子技术”（ADEQUADE）项目，该项目在欧洲八个国家拥有 30 多个合作伙伴，旨在利用量子传感技术增强作战能力。<sup>61</sup>这些包括增强定位、导航和定时能力，以及推进射频传感和光电传感。<sup>62</sup>法国和丹麦政府正在合作测试一种用于确定地球引力场的量子传感器，并评估全球卫星定位导航服务在危机期间中断的情况下，如何利用量子系统进行导航。<sup>63</sup>最后，随着 2023 年《国家量子战略》的通过，英国承诺在未来十年内将量子投资增加一倍以上，投资达 25 亿英镑。<sup>64</sup>英国还在开发用于紧凑型卫星（被称为“立方体卫星”）的量子传感器原型，作为探索量子技术从地球到外太空应用的倡议的一部分。<sup>65</sup>

在印度洋-太平洋地区，印度国家安全委员会秘书处在军事电信工程学院建立了量子实验室，以应对量子信息对军事系统的威胁，如后量子密码学。<sup>66</sup>日本政府也宣布将生产国产量子计算机，并建立四个量子研究中心。

过去几年表明，量子技术的前景正在影响双边和多边量子伙伴关系的形成，例如美国与瑞士、日本和澳大利亚签署的协议。<sup>67</sup>伙伴关系也是北约《量子技术战略》的一个关键特征，该战略

---

<sup>55</sup> 澳大利亚政府，《国家量子战略》，2023 年 5 月 3 日，<https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy>。

<sup>56</sup> Mateusz Masiowski 等人，《量子计算资金依然强劲，但人才缺口引发关注》，麦肯锡，2022 年 6 月 15 日，<https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-funding-remains-strong-but-talent-gap-raises-concern>。

<sup>57</sup> 同上。

<sup>58</sup> 同上。

<sup>59</sup> “俄罗斯量子专利申请在制裁中减少”，《莫斯科时报》，2023 年 6 月 14 日，<https://www.themoscowtimes.com/2023/06/14/russias-quantum-patent-applications-decline-amid-sanctions-a81499>。

<sup>60</sup> Laura Kabelka，《委员会宣布欧洲量子计算机的六个站点》，Euractiv，2022 年 10 月 5 日，<https://www.euractiv.com/section/digital/news/commission-announces-six-sites-for-european-quantum-computers/>。

<sup>61</sup> Indra，“ADEQUADE：用于防御的先进、颠覆性和新兴量子技术”。

<sup>62</sup> 同上。

<sup>63</sup> 丹麦技术大学，“正在格陵兰岛测试的导航量子传感器”，《幻影》，2023 年 6 月 12 日，<https://miragenews.com/navigation-quantum-sensor-being-tested-in-1024820>。

<sup>64</sup> 联合王国创新、科学和技术部，“国家量子战略”，2023 年 3 月 15 日，<https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy#full-publication-update-history>。

<sup>65</sup> Alanna Madden，“Researchers to Test Limits of Quantum Technologies with Nanoparticles in Space”，Courthouse News Service，2023 年 6 月 21 日，<https://www.courthousenews.com/researchers-to-test-limits-of-quantum-technologies-with-nanoparticles-in-space/>。

<sup>66</sup> 印度国防部，“印度陆军在 MHOW (MP) 建立量子实验室”，2021 年 12 月 29 日，<https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1786012>。

<sup>67</sup> Thomas Wong，“美国和瑞士签署联合声明加强量子合作”，国家量子计划，2022 年 10 月 21 日，<https://www.quantum.gov/the-united-states-and-switzerland-sign-joint-statement-to-strengthen-collaboration-on-quantum/>；

强调“一个具备量子技术的联盟首先需要盟国之间更紧密的合作，以及一个有弹性的量子生态系统，而不仅仅是提供适当的资金”。<sup>68</sup>

一些预测显示，到 2027 年底，各国政府和私营企业在量子计算领域的投资可能超过 160 亿美元。<sup>69</sup>

---

美国国务院，《关于量子合作的东京声明》，2019 年 12 月 19 日，<https://www.state.gov/tokyo-statement-on-quantum-cooperation/>；白宫，“美国和澳大利亚携手打造量子未来”，2021 年 11 月 18 日，<https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2021/11/18/the-united-states-and-australia-partner-to-build-quantum-future/>。

<sup>68</sup> 北大西洋公约组织（北约），“北约量子技术战略摘要”，2024 年 1 月 17 日，[https://www.nato.int/cps/en/natohq/official\\_texts/221777.htm](https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts/221777.htm)。

<sup>69</sup> IDC，“IDC 预测 2027 年全球量子计算市场将增至 76 亿美元”，2023 年 8 月 17 日，<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS51160823>。

## 6. 结论

随着量子技术的进步，它为国际安全带来了变革性潜力的同时，也带来了复杂的风险。就量子创新采用一种全面的方法——涵盖从开发到部署的完整生命周期——对于理解其对全球稳定与军备控制的影响至关重要。特别是，量子计算机有可能威胁现有的密码协议，这突出了向后量子密码学标准转型的重要性。这一转型对保护关键基础设施、通信和防御系统免受新兴网络安全威胁至关重要。

应对这些挑战，政府、工业界和学术界之间需要紧密合作。这种跨部门的伙伴关系对于培养具备量子技术能力的劳动力、减少量子技术进步可能带来的数字鸿沟至关重要。此外，制定多边治理框架、建立信任措施以及开展能力建设项目将有助于支持负责任的量子创新。

根据阿马拉法则，“我们往往会高估一项技术的短期效应，而低估其长期效应”。鉴于此，量子技术的未来需要谨慎且协调一致的行动。

通过促进全球合作与准备，国际社会可以负责任地整合量子技术的进步。这不仅能确保量子技术成为稳定与安全的工具，还能避免其成为冲突和混乱的根源。