

灯塔的作用

一束不能动的光，怎么告诉大海上每一条船「你在这里」

王建硕

费曼式写法 · 由多个 AI 代理撰写与互相审校

导读

一束不能动的光，怎么告诉大海上每一条船「你在这里」

海边长大的孩子都知道，灯塔大概是最「没用」的建筑：它不挡风、不住人（守塔人住在旁边的小屋）、不打鱼、不泊船，几百年如一日地站在礁石上，做唯一一件事——亮。

可就是这样一个「什么都不做」的建筑，值得写一本书。因为只要你认真追问一句「它到底是怎么起作用的」，就会发现每个答案都会牵出一个新领域：光怎么够到几十公里外的船？——这是几何和光学。水手怎么分清海岸线上一串塔？——这是信息编码。雾天怎么办？——这是系统工程。谁来付钱？——这是经济学最著名的一桩公案。一座塔上为什么要住人？——这是人与机器的可靠性分工。GPS 这么准了为什么还不拆？——这是关于备份与信任的深刻问题。

这本书就沿着这条追问往下走。它要回答的贯穿问题只有一个：**一束不能动、不会说话的光，凭什么几百年来一直是大海上最可靠的那句「你在这里」？**

写作的方法只有一个规矩：不用大词。每一个专业名词第一次出现，都会当场用大白话解释清楚；每一个原理，都尽量给一个能摸得着的类比。读这本书不需要任何航海或物理背景，只需要好奇心。

旅程从 1707 年一个漆黑的夜晚开始——那天晚上，一支英国舰队径直开上了海图上一清二楚的礁石。他们不是没看见危险，他们是压根不知道自己在哪。这个区别，是理解灯塔的钥匙。

第一章 · 船在夜里怕什么

1707 年 10 月 22 日深夜，英国海军一支舰队在返航途中撞上英格兰西南角外的锡利群岛。四艘军舰触礁沉没，超过一千四百名水兵丧生。这是英国海军史上最惨的非战斗损失之一。

诡异的地方在于：这片礁石没有藏在暗处。它在所有海图上都标得清清楚楚，是航行了几个世纪的水手人人都知道的地方。舰队也不是被风浪吹偏航线的——他们是按照自己计算的位置，**径直**开上了礁石。

也就是说，礁石没有动，海图没有错，船是自己在黑暗里走丢了。

船在海上怎么知道自己在哪

今天打开手机就能看到自己的坐标，我们很难想象「不知道自己在哪里」是什么感觉。但在 GPS 之前的三千年里，远洋船确定位置主要靠一个办法：航位推算——从已知的出发点开始，不断记录「我往哪个方向开了多久、开多快」，然后在海图上一步步把位置推出来。

大白话

说白了，航位推算就是闭着眼数数。你蒙上眼睛从家门口出发，心里默念「向北走了五十步，再向东走了三十步」，然后声称自己站在哪个路口。走一百步，误差可能只有几步；走一万步，谁也说不准你在哪。

海上的「闭眼数数」比陆地上糟糕得多。船速靠往船尾扔一块绑着绳子的木板估出来，方向靠罗盘，可罗盘会被船上的铁器带偏，海流会不声不响地把船整体推歪，风会把船往下风处压。每一项误差都不大，但它们会**累加**。跨一次大西洋，误差积累到几十甚至上百海里是常事。锡利舰队返航前在海上漂了几周，等他们看到陆地轮廓时，推算位置和真实位置已经差出了一整条海峡的宽度——他们以为自己在开阔海面上，其实正对着礁石。

这就是夜里行船真正怕的东西：**不是看不见，而是算不准**。看不见只是眼前黑，算不准是你连「该不该怕」都不知道。

灯塔回答的其实不是「前面有礁石」

直觉上，我们以为灯塔的作用是「照亮危险」——像路边的警示牌：前面有坑，减速慢行。但只要想想就知道不对：灯光照不到几百米外的水下暗礁，而且礁石不会跑，船才在动，「照亮礁石」对一条高速接近的船几乎没用。

灯塔真正回答的问题是另一个：「**你现在在哪里**」。

每一座灯塔的位置都精确地印在海图上。夜里你看到一束光，查到它对应海图上哪个点，你就瞬间完成了陆地上任何一个参照物都做不到的事——在茫茫大海上，把一个「已知点」直接送到了你眼前。你看到光在正北，就知道自己在灯塔正南；再结合你对距离的估计，海图上那个飘忽的「我大概在这儿」，一下子收缩成一个具体的位置。

用现代的话说，灯塔是一个定位信标：一个位置已知、并且不断广播「我在这里」的固定参照点。GPS 卫星干的是同一件事，只不过卫星在天上、用无线电广播，灯塔在岸上、用光广播。原理上，它俩是同一种东西的两次发明。

大白话

一句话总结：灯塔不负责帮你看清礁石，它负责让你算清自己。海图早就告诉你礁石在哪了，灯塔补上的是另一半——你在哪。

一个不动的点，为什么比一万句提醒有用

注意灯塔这个设计的「懒」：它不动、不追船、不针对任何人发消息，甚至不在乎有没有人在看。它只是站在一个精确已知的位置，一遍又一遍地亮。

但正是这个「懒」让它可靠。因为它什么判断都不做，所以它不会错——锡利舰队的水兵恰恰死于「做了判断」：他们判断了自己在哪，判断错了。灯塔把判断原样交还给每一艘船，自己只提供一条无可争辩的事实：这束光从海图上这个坐标发出来。剩下的事，让每双盯着它的眼睛自己去算。

这本书要回答的贯穿问题，到这里可以正式提出来了：**一束不能动、不会说话的光，凭什么几百年来一直是大海上最可靠的那句「你在这里」？**

要回答它，我们得一层层往下拆。第一层是最朴素的问题：船还在几十海里外，这束光怎么够得着它？这就要先算一笔几何账——请看下一章。

第二章 · 为什么非要那么高

上一章说了，灯塔的价值在于让远处的船看见它。那么第一个工程问题就来了：多远的船能看见？

很多人（包括很多早期的建塔者）直觉地以为，答案是「灯有多亮」——灯越亮，照得越远。这个直觉错得很彻底。决定灯塔射程的第一因素不是亮度，而是**高度**。原因是小学几何：地球是圆的，而光走直线。

先算一笔账：你能看多远

站在海边，你的眼睛离地大约 1.7 米，能看到的地平线只有约 5 公里远。不是视力不行，而是 5 公里开外的海面已经「弯」到你看不见的角度下面去了。爬上一棵 10 米高的树，地平线就推到 11 公里开外。爬到 100 米高的楼顶，你能看到 36 公里。

这个规律有个简单的估算公式，值得记住，因为它支配了整本书：

$$\text{地平距离（公里）} \approx 3.57 \times \sqrt{\text{高度（米）}}$$

高度开平方再乘个系数，就是你能看多远。推导不难：把地球当成半径 6371 公里的圆，从你眼睛的高度向地球表面画一条切线，用勾股定理解出来，再把单位换算成公里，就得到这个 3.57。（实际上大气会把光线微微往下弯，让你看得比纯几何再远一点，真实系数约为 3.86——细节不影响结论。）

大白话

平方根是个坏消息：它意味着「加倍努力，收益递减」。高度翻四倍，看得才远一倍。这就是为什么灯塔不能靠「再高一点」无限扩大射程。

灯塔的射程，是两段地平线相加

关键的精妙之处在这里：灯塔的光被船看见，要跨过两段「弯曲」——从灯到海面切点一段，从切点到水手的眼睛一段。所以灯塔的实际射程 地理视程是：灯塔的地平距离，加上水手眼睛的地平距离。

算一个具体例子。一座 50 米高的灯塔，地平距离约 25 公里；一位水手站在甲板 8 米高的瞭望位置，他的地平距离约 10 公里。两者相加：船在 **35 公里**外就能看到这座塔的灯光——尽管这束光其实连海面都「照」不到那么远，它只是高高举起，让远处的眼睛能隔着地球的弧度瞄到它。

反过来说，一座只有 10 米高的灯标，就算灯泡亮得晃眼，20 公里外的船也永远看不见它——地球把它藏住了。高度不够，亮度是零的倍数，还是零。

大白话

一句话：灯塔不是把光「照」向远方，而是把光「举」过地球的曲线。亮度决定你在视程内看得清不清，高度决定你有没有视程。

古人早就懂这个账

两千三百年前建成的亚历山大灯塔——古代世界七大奇迹之一——立在埃及亚历山大港外的法罗斯岛上，估计高约 100 到 130 米，按今天的标准相当于一栋三四十层的楼。在没有任何机械的年代堆出这样一座石塔，工程代价极其惊人，但古人别无选择：要让进港的船在几十公里外就找到港口，唯一的办法就是把火盆举过地球的曲线。它后来矗立了一千多年，「法罗斯」(Pharos) 这个词在好几门语言里直接变成了「灯塔」的代名词。

反面的教材同样有名。17 世纪末，英国人在普利茅斯外海一块叫埃迪斯通的礁石上造了第一座离岸灯塔——那是一块大部分时间泡在海里的礁石，沉船无数。第一座塔是木质结构、造型花哨，1703 年一场大风暴把它连人带塔整个抹掉了；后来重建又被火烧掉。直到 1759 年，工程师斯米顿用互相咬合的花岗岩块砌出一座矮壮的石塔，才真正站住——它的设计思路（宽底、锥形、石块互锁）此后被全世界抄了一百多年。离岸灯塔自此从「不要命的冒险」变成「可靠的工程」。顺便一提，今天你去普利茅斯还能看到斯米顿塔的上半段

——它所在的礁石后来被海水掏松，塔身被整体搬上岸，原址换了新塔。石头赢了大海一次，但没赢到永远。

高度的尽头，轮到亮度登场

把塔修到极限——现代大型灯塔大约 40 到 60 米，地理视程大约 40 公里——之后，问题就变了：在视程的边缘，几十公里外的光已经衰减得极其微弱，普通灯火根本穿不透这么远的路程。这时候，亮度才终于从配角变成主角。

19 世纪初，一盏普通油灯的有效可见距离也就是几海里，连地理视程的一半都用不满。工程师们手里握着「40 公里视程」这个理论上限，却造不出配得上的光源。直到一个法国物理学家把光学重新想了一遍——下一章，菲涅尔登场。

第三章·菲涅尔的玻璃刀

上一章留下了一个矛盾：塔的高度给了灯塔大约 40 公里的理论视程，但 19 世纪初的油灯连一半都用不满——光太弱，走不了那么远。接下来这二十年里发生的事，是灯塔史上最重要的一次技术跃迁，而它的核心想法简单到令人惭愧：**光没被用掉，是白白散掉了。**

问题不在灯，在于光往四面八方跑

一盏油灯的火苗向所有方向发光：往上照亮天花板，往下照亮地板，往四周照亮墙壁。可船在海上，只在水平方向需要光。火苗发出的光里，真正有用的只是水平那一圈，其余全部浪费。

18 世纪的工程师想出的对策是抛物面反光镜：在灯后面放一个碗状的抛光铜镜，把往后跑的光兜住，聚成一束往前打。这比裸火苗强得多，但天花板和地板方向的光还是收不回来，而且镜子抛光再好也有吸收损耗，几十面灯加镜子的阵列围成一圈，每面镜子只朝一个方向——合起来还是漏洞百出。当时最好的灯塔，送到海上的光也抓不住火苗总量的零头。

要再进一步，需要的不是更亮的火，而是一种能**把火苗整个包起来、只留一个出口**的光学装置。1822 年，法国物理学家奥古斯丁·菲涅尔把它造了出来。

把凸透镜「拍扁」：一个违反直觉的发明

聚光的标准工具是凸透镜，放大镜那种。可要罩住一座灯塔的火苗，透镜直径得一米开外——一块实心玻璃做成这么大的凸透镜，中间会厚达几十厘米、重达数吨，根本没法磨、没法装，玻璃内部还会大量吸光。

菲涅尔的关键洞察是：**光线偏折只发生在玻璃的表面，玻璃内部多厚根本无所谓。**既然起作用的只是表面那个「斜率」，那就把每个斜率保留下来，把斜率之间的「肉」全部抽掉——于是一个鼓鼓的大凸透镜，被拍扁成了一圈圈同心台阶。每个台阶的斜面 and 原来凸透镜对应位置的斜面一模一样，弯折光线的的能力一点不少，玻璃用量却只剩个零头。

就像一件厚棉袄：保暖靠的是棉花，可如果你只想要「棉袄的外形」，把棉花抽掉、只留一层层轮廓——菲涅尔对凸透镜做的就是这件事。看着不像透镜，光走完的路径却分毫不差。

中央的一圈台阶透镜负责把正前方的光掰平。但火苗还往上、往下发光，这些光以很陡的角度射出来，透镜掰不动——菲涅尔干脆在透镜上下方挂一圈圈棱镜，利用光在玻璃内部的全反射，把这些陡峭的光也折回水平方向。折射加上全反射，两路合围，火苗四面八方发出的光，大部分被拧成了一把水平的「刀」。这种设计今天就叫菲涅尔透镜，你在投影仪、汽车大灯、甚至手机闪光灯上都能见到它那一圈圈台阶。

效果有多夸张

1823 年，第一面菲涅尔透镜装上法国吉伦特河口、欧洲最古老的科尔杜昂灯塔。同等的油灯，有效光强比反光镜时代提高了一个数量级以上——换句话说，**火还是那把火，光却一下子「亮」了十几倍**。到 19 世纪中后期配上更强的灯芯和后来的电灯，最大号的一级菲涅尔透镜能把光束推到几十万甚至上百万坎德拉（光强单位，一支普通蜡烛约 1 坎德拉）的级别，把第二章算出的 40 公里地理视程真正用满，甚至超出——好天气里，水手在理论地平线上刚看到灯光露头，叫「初显」，这一刻就是船长们等了半夜的定位时刻。

代价呢？一面大型菲涅尔透镜由几百块手工磨制的玻璃棱镜拼成，装在黄铜骨架里，整个像一件巨型珠宝。它贵、难造、怕碰，以至于一百多年后很多灯塔退役时，透镜被当成文物请进博物馆——它们确实是 19 世纪光学工艺的巅峰，在那个没有塑料注塑的年代，每一圈台阶都得靠匠人手工研磨出来。

回到我们的问题

现在，这本书开头的问题已经有了大半答案：灯塔之所以能「够得着」船，是靠高度赢过地球的曲线（第二章），靠菲涅尔透镜把火苗的每一分光都压进一道光束（本章）。

但还剩一个致命漏洞：海边不止一座灯塔。夜里水手在海平线上看到一点闪光，他怎么知道那是**哪一座**塔？认错一座塔，等于把「我在这」听成「你在那」——比没有光更危险。下一章讲灯塔怎么解决这个问题，而答案出人意料地「现代」：给每座塔一个独一无二的签名。

第四章 · 每座灯塔有自己的签名

第三章结尾的漏洞是：海岸线上灯塔一座挨一座，水手在夜里看到一点闪光，怎么知道它是哪一座？

别小看这个问题。认错灯塔比看不见灯塔危险得多——看不见，你至少知道自己不知道位置，会加倍小心；认错了，你会拿着一个错误的位置，自信地把船开上礁石。所以灯塔光有房（高度）、有刀（透镜）还不够，它还得有**名字**，而且要让水手在几十公里外、隔着海浪和雾气，光凭看一眼就能念出这个名字。

答案：不让它一直亮，让它按节奏闪

灯塔的「名字」叫**灯质**——这束光的亮灭节奏。每座灯塔的灯质都是独一无二的，清清楚楚印在航用海图和灯标表上，用的是一套全世界通用的缩写。比如海图上写 **Fl(3) 15s**，意思是：每 15 秒一个循环，循环内连闪 3 下。水手夜里看到海平面上的闪光，掏出秒表一数：「连闪三下、隔十五秒」，翻开灯标表一对——是某某塔。定位完成，连塔的影子都不用看见。

这套编码的花样不少：

- **定光** (F)：一直亮，不闪。最古老，但也最容易跟岸上灯火混淆，现在很少单独用。
- **闪光** (Fl)：暗的时间长，亮的时间短——「大部分时间灭着，隔一会儿闪一下」。
- **互光** (Oc)：反过来，亮的时间长，暗的时间短——「一直亮着，隔一会儿眨一下眼」。
- **联闪** (如 Fl(3))：一个循环里闪固定几下一组，靠数数区分。

节奏之外还有颜色：白光、红光、绿光。节奏乘颜色乘周期，组合空间足够让一片海域里任何两座塔的签名都不重样。

这其实就是一种原始的无线电编码，比摩尔斯电码的发明还早地大规模投入使用。灯塔发的是极低频的信号——十几秒才一个循环——但信息量刚好够用：不用传输任何内容，只要传输「我是谁」。

闪光居然是「顺手」的收获

有意思的是，让灯塔闪起来的机械装置，最初不是为了发签名，而是菲涅尔透镜的自然产物。透镜把光聚成几束锋利的光柱，让透镜**旋转**起来，光柱就像探照灯一样扫过海面——站在固定位置的船看，光束扫过来一下、过去一下，天然就是一次「闪」。想用几组透镜面板、转多快，就能组合出不同的节奏。

于是 19 世纪的灯塔顶上都有一套巨大的旋转机构：几吨重的玻璃透镜浮在一个水银槽上（水银把几吨的重量浮起来，摩擦力小到一只手就能推动整面透镜），由一套和落地大钟同源的钟表发条机构驱动——重锤沿着塔中央的井道缓缓下坠，守塔人每隔一阵就要上去把重锤重新摇回塔顶。灯塔的心跳，是靠人一圈圈摇出来的。

旋转还带来一个意外的好处：人眼对「突然出现的光」远比「一直亮着的光」敏感。同样强度的光，闪一下比常亮更容易被余光捕捉到，也更不容易跟岸上星星点点的灯火混淆。签名机制顺手把「看得清」也加强了——好的设计经常这样，一个改动解决两个问题。

白天怎么办：给塔身也发一个签名

夜里靠灯质，白天靠什么？靠塔身。灯塔白天就是一个巨型地标，所以它们的涂装从来不是为了好看：红白横条纹、黑白螺旋、纯黑、纯红……每一种都是一份日标，同样印在海图上。水手白天望见一座红白条纹的塔，翻开表一查就知道是哪座。美国北卡的哈特拉斯角灯塔那个著名的黑白大螺旋，远看像一根巨型理发店转灯，作用一模一样：在几十公里外就自报家门。

涂装还有个隐藏功能：条纹塔在颜色单调的沙丘背景前显眼，纯色塔在杂乱的城镇背景前显眼——日标的配色是针对「它白天站在什么背景前」设计的。又一次，一个设计同时管两件事。

最妙的一招：同一座塔，换个颜色就是在报警

签名之上，还有一层更聪明的用法。有些灯塔故意给不同方向装不同颜色的玻璃扇区：朝向安全航道的那片扇形是白光，朝向暗礁浅滩的扇形是红光。于是同一条船、同一座塔——你看到白光，说明你在安全航道里；开着开着光变红了，不用查任何表，**你已经偏进危险区了**。这种叫扇区灯的设计，把「你在哪」的答案直接编译成了颜色：光本身就是警报。

到这里，灯塔的信息系统完整了：高度管「看得见」，透镜管「看得清」，灯质和日标管「认得准」，扇区管「看得懂」。可这一切都有一个共同的前提——空气得是透的。而大海最擅长的，恰恰是起雾。下一章讲光失效的时候，灯塔怎么办。

第五章 · 光穿不过雾的时候

前四章搭起来的系统有一个共同软肋：它们全都依赖光能走到水手眼睛里。而大海最常用的招数，恰恰是把这条路掐断——起雾。

雾对光的杀伤不是「挡」，而是散射：光撞上悬浮的小水滴，向四面八方反弹，原来那束拧成刀的光柱被揉成一团白蒙蒙的亮。结果很反直觉：雾里开大灯反而更看不清，因为你自己这团被散射的光会把眼睛晃花。海上同理——雾浓的时候，几百万坎德拉的光束在几百米外就化掉了，第二章算的那 40 公里视程直接归零。

灯塔最危险的时刻，恰恰就是灯塔失效的时刻。怎么办？答案很朴素：眼睛走不通，换耳朵。

雾号：用最大的嗓门报坐标

19 世纪的灯塔陆续配上了各种发声装置，统称雾号。早期是敲钟、放炮，后来是用压缩空气驱动的大喇叭——有的像巨大的蒸汽汽笛，有的叫「风鸣器」，本质上是一片被气压推着高速振动的金属膜片，声音低沉得不像乐器，更像某种巨兽的吼声，几公里外能感觉到胸口在共振。

注意雾号和灯质是同一套逻辑：它不传递任何内容，只传递「我在这里」，而且也有自己的节奏编码——几分钟一声、一声几长几短，印在灯标表上，跟闪光节奏一样用于「对名字」。原理完全平移，只是换了载体。

大白话

灯塔体系其实从来不是「一套光学系统」，而是「一套报坐标系统」。光是首选载体，声音是备份载体——要的是「我在这里」这四个字能送达，至于用光还是用嗓子，看天气。

声音是个不太靠谱的备份

但换载体要付代价。声音在海上是个脾气古怪的信使：

- **它会拐弯。**空气上冷下热或上热下冷时，声波会被温度层折弯，绕开某些区域——文献里有大量记载：船在离雾号很近的地方偏偏什么都听不见，叫「无声区」。雾号就在旁边吼，你却以为它没开。
- **它难辨方向。**光从哪来一眼就知道，声音却在海面、岩壁和雾气之间来回反射，回声四起，水手经常判断错雾号的方向——在最需要方向的时候给一个错方向，比没有还糟。
- **它太慢。**声速约每秒 340 米，十公里外的雾号，声音在路上要走半分钟，节奏编码的时间感会被传播延迟弄模糊。

所以雾号从来只是「雾里凑合用」，没人拿它替代灯。这个备份的尴尬之处，反而衬托出光这个主载体有多优秀：走直线、不反射、瞬时到达、方向一目了然。灯塔体系的第一性原理在这里露出轮廓——**能用光，绝不用别的；用不了光的时候，也得有别的。**

电波登场：看不见的接力棒

20 世纪，接力棒交到无线电手里。沿岸建起无线电指向标：灯塔位置上装一个不断发送摩尔斯码呼号的无线电台，船上用环形天线慢慢转，信号最弱的方向就是电台所在的方向——拿两座指向标的方位在海图上一交叉，位置就出来了。雾、黑夜、阴天统统不影响，这是第一次有东西能在光完全失效时提供精确方位。

再后来是雷达时代的雷达应答标：船载雷达发出一束电波扫过海岸，装在灯塔上的应答器被「照」到后，立刻回发一段编码脉冲，在船的雷达屏幕上画出一小段带摩尔斯码的亮线——等于灯塔在雷达屏幕上举牌自报家门。船不用看见灯塔，灯塔「看见」雷达波会主动回答。

到这里，一套完整的三层结构成型了：**光是主信标，声音管大雾，电波管一切**。三层各自独立、互为备份，任何一层失效，剩下的还在报坐标。这个「同一个信息、三条互不相干的通道」的思路，第九章讲 GPS 时代时还会回来——它是灯塔留给现代工程最重要的一条遗产。

不过，塔越修越多、号越配越全，一个绕不开的俗问题也浮上来了：这套系统又贵又费心，钱谁出？水手白看这束光，凭什么？下一章要讲的是经济学里最著名的一桩公案——而它的结局出乎所有教科书的意料。

第六章 · 谁来为这束光付钱

前五章讲的都是技术：光怎么够远、怎么够亮、怎么报名字、雾天怎么办。这一章换个学科——因为灯塔在另一个领域的名气，可能比在航海史上还大：它是**经济学教科书里被引用最多的例子之一**。而这桩公案的结局，堪称学术史上一次漂亮的翻车与再翻车。

教科书的标准答案：灯塔必是公家的

故事从 1848 年讲起。经济学家穆勒在《政治经济学原理》里拿灯塔举例：船在海上看了灯光，你没法向他收费——总不能在海上设收费站吧？谁都能白看，就没人愿意掏钱建塔，市场失灵，所以灯塔这种东西必须由政府来建。

这个推理后来被总结成两个特征：灯塔的光**非排他**（没法只让付钱的船看、挡住没付钱的）且**非竞争**（多一条船看，光一点也不少）。具备这两条的东西叫**公共品**，市场供给不足，政府必须出手。20 世纪，诺贝尔奖得主萨缪尔森在影响了几代人的《经济学》教科书里把灯塔写成了公共品的头号案例。几代学生背的都是这个结论：灯塔，天生是公家的。

大白话

逻辑链看起来无懈可击：拦不住白看 → 收不上钱 → 没人愿建 → 只能政府建。问题只有一个——它和历史事实对不上。

科斯去查了档案：灯塔当年居然是私营的

1974 年，后来也拿了诺贝尔奖的罗纳德·科斯干了件让同行很没面子的事：他没在书房里推演，而是去翻英国灯塔的档案。结果他在论文《经济学中的灯塔》里摆出一串事实——17 到 19 世纪，英国相当一部分灯塔是**私人建造、私人运营、并且盈利的**。

运作模式大致是：船主们吃尽沉船的苦头，联合向王室申请特许；拿到许可后，私人出资建塔，作为回报，获得向过往船只收取**灯塔费**的权利。前面第二章那座命途多舛的埃迪斯通灯塔，最早一代就是商人温斯坦利自己掏钱建的，赌的就是收费权。到 1820 年，英格兰和威

尔士在役的 46 座灯塔里，有 22 座仍由私人经营；而如果问「最初是谁出钱建的」，46 座里有 34 座的答案是私人。

所以「拦不住白看就收不到钱」这个前提，在实践中被一招化解了——而化解的办法，是这章真正值得记住的东西。

真正的精妙处：不在海上收，在港口收

灯塔费怎么收？确实没法在海上拦船收费，收费的人想通了这一点，干脆**不在海上收**。他们的观察是：看灯的船终究是要进港的。于是灯塔费不在灯旁收，在**港口**收——船一进港，按吨位和航次缴纳灯塔费，作为使用整条航道上灯塔网络的对价。灯你可以白看，港你不能白进；而进港的船，恰恰是看灯看得最多的船。受益者和对价就这样被一根制度的线拴在了一起。

大白话

这是制度设计里非常好用的一招：收费点不必设在受益发生的地方，只要设在一个「受益者绕不开的咽喉要道」。你在高速公路上收不到「看风景费」，但你可以在景区门口收门票。

再翻车：私营也没那么简单

故事讲到这里，似乎教科书完败。但后来的经济史学者把档案翻得更细，发现科斯也讲得太痛快了：所谓「私营」灯塔，收费权是王室特许的，费率是官方核定的，欠费是可以官方追缴的——那更像一种「政府授权私人经营的垄断收费」，离自由市场很远，离税收倒是很近。19 世纪中期，英国议会嫌私人收费又贵又乱，干脆让老牌航标机构三一公会（一个 1514 年就成立的航海行会）把私营灯塔逐步收购收编，统一用灯塔费供养，一直延续到今天。

所以这桩公案的最终结论不是「私营赢了」或「国营赢了」，而是一个更有意思的画面：**灯塔两百多年里换过好几种所有制，但「进港交费」这个制度内核几乎没变**。变的只是谁来收、交给谁，不变的是那个咽喉要道。

灯塔教给我们的，不是站队

回头复盘这桩公案，每一方都贡献了半句真话。穆勒和萨缪尔森说对了「海上收不到钱」；科斯说对了「收不到钱不等于没人建」；后来的修正者说对了「能建不等于纯市场」。合起来的完整图景是：**一件事的「公共性」不是它的物理属性，而是制度设计的结果。**同一束光，配上不同的收费机制，可以是公共品、可以是俱乐部品、也可以是特许经营品。

这也是灯塔给我们的又一条工程启示：遇到「没法收费/没法计量/没法约束」的难题时，别急着宣布「市场失灵」，先找找有没有一个「港口」——那个受益者绕不开的咽喉要道。

技术和钱都齐了，还差最后一块东西：人。塔再高、灯再亮，总得有人点灯、擦镜、摇重锤。下一章，去见见那些把自己活成灯塔一部分的人。

第七章 · 守塔人

前六章把灯塔越讲越像一台精密机器：几何、透镜、编码、雾号、制度。但这台机器有个无法省略的零件——人。直到 20 世纪末，几乎每座灯塔里都住着人。为什么非得有人住在塔里？这个问题的答案，藏着一条关于「系统可靠性」的深刻道理。

灯不是点上就完事的

先看清守塔人每天在干什么。自动化之前的灯塔是一头需要不停伺候的野兽：

- **灯要伺候。**油灯的灯芯烧一阵就会结炭、火苗变暗发烟，守塔人得定时修剪灯芯、补充灯油——一炉灯油烧不了整夜，值夜的人得按时添油，还要不停擦拭被烟熏黑透镜的玻璃。第三章那面价值连城的菲涅尔透镜，每天黎明都要有人逐块擦拭，一点煤灰都会吃掉宝贵的光强。
- **钟要上弦。**第四章说的旋转机构靠重锤驱动，重锤坠到底，光柱就停转，灯质就没了。守塔人每隔一两小时就得爬上灯室，把几吨重的「钟」重新上满发条——整夜如此，风雨无阻。
- **天要盯着。**起雾了，雾号不会自己响，得有人判断「该开号了」。守塔人还要记录天气、海面、过往船只，几十年积累的日志后来成了气象和海况研究的史料。
- **意外要兜着。**灯熄了、机械卡了、窗户被浪打碎了——每一件在深夜里发生的故障，都要有人当场处置。因为灯塔的故障不是「服务降级」，是**人命**。

注意最后一条的分量。普通机器坏了，损失是停机；灯塔坏了，损失是某条不知情的船继续信任着一束不存在的光。这种「故障代价由毫不知情的陌生人承担」的系统，必须有人在场盯着——这就是守塔人存在的根本理由：**他是这台机器的通用故障处理器。**

人是最强的冗余，也是最脆的环节

工程上管这个叫**冗余**——关键部件多备一份，坏了一个还有另一个。守塔人就是灯塔系统的终极冗余：透镜的设计者不可能预见所有故障，但一个在场的、训练过的人，几乎可以处置任何故障——包括「设计者压根没想到过的那种」。直到今天，航天发射、核电站、海底电缆站，凡是「失效即灾难」的系统，都保留着一个角色不同、本质相同的人。

但用人当冗余，就要接受人的全部弱点。守塔人的生活是被孤独定义的：离岸岩塔上的守塔人几周一换班，遇上风暴补给船靠不了岸，几个人就在塔里干耗；吃的是腌肉和硬面包，听的是永不停歇的风。人性在这种环境下会以各种方式出问题——1900 年 12 月，苏格兰外海弗兰南群岛上，三名守塔人一夜之间消失得无影无踪——救援船登岛时，塔里空无一人，灯没点，钟停了，两件油布雨衣不见了、一件还挂在钩子上。日志的最后几行语焉不详，此后再没人知道那个夜里发生了什么，成了航海史上最著名的悬案。

火也一直悬在头顶：满塔灯油加上木结构，1755 年埃迪斯通灯塔失火，守塔人亨利·霍尔仰头灭火时吞下一口熔化的铅水，几天后死亡——一个 94 岁的老人，死前还坚持把事情经过讲清楚。

守塔人还干一件份外的事：救人

制度上，守塔人的职责只是「维持灯亮」。但灯塔恰好立在最危险的海岸，所以守塔人常常成了离海难最近的人——也就成了救援者。1838 年，英格兰朗斯通灯塔守塔人的女儿格蕾丝·达林，在风暴夜里看到客轮「福法尔郡号」在礁石上断成两截，她和父亲划着小船顶着巨浪两趟往返，救起九名幸存者。那年她 22 岁，一夜之间成了全英国的英雄。类似的故事在每个多风暴的海岸都有一擦——守塔人是灯塔系统里唯一会「主动出手」的部件，机器做不到。

塔里的人走了

电气化改变了一切。电灯不用修剪灯芯，电机不用上发条，自动雾号配上雾探测器自己开关，远程监控把故障告警直接传到岸上。20 世纪里，守塔人一批批撤离；英国最后一座有人灯塔——北福兰灯塔——在 1998 年完成自动化，守塔人这个延续了几百年的职业正式落幕。

人走了，那个「通用故障处理器」没了，系统靠什么兜底？靠的就是第五章讲过的那条思路：通道冗余。灯熄了有备灯，备灯熄了有岸站告警，光学失效还有无线电和雷达应答标。自动化不是取消了冗余，而是把「一个人守在塔里」换成了「多层互相独立的机器」。哪个更可靠，第九章还会回到这个问题。

守塔人的故事讲完了，但还有一个更黑暗的群体没讲：既然灯塔救人，那就有人靠灯塔的反面发财。下一章，去看看黑暗里的生意。

第八章·黑暗里的生意

前面七章讲的都是灯塔的建设史。这一章讲它的对立面——因为只要有人靠「船知道自己在哪」活下来，就一定有人靠「船不知道自己在哪」发财。

沉船曾经是一笔「天降的收入」

要理解这件事，先得把现代的道德眼镜摘掉。在几百年前的穷困海岸，一艘触礁的船不是灾难新闻，而是一次物资空投：船上有酒、布匹、木材、五金——全是渔村一年都见不到的值钱货。很多沿海地区长期存在一种半公开的「沉船权」习俗：冲上岸的货物归当地人，这在不少地方的惯例法里是被默许的。一首流传甚广的英格兰民谣里，农妇直截了当地祈祷：

「上帝保佑，让海里沉几条船吧，冬天好过一点。」

更黑暗的是规则的一个漏洞：在一些地方的惯例里，如果船上**无人幸存**，货物的归属反而更「干净」——没人能主张那是别人的财产。这个规则的恶意一目了然：它实际上在奖励「别救人」。这不是传说，而是被当时的人反复批评、最终推动修法的一个真实漏洞。

假灯：把定位武器反过来用

顺着第一章的逻辑想：既然一束光是「你在这里」的可信声明，那么造一束**假光**，就是一句能杀人的谎话。在错误的悬崖上挂一盏灯，船会把它认成某座真塔，自信地修正航线——修向礁石。

民间传说里这种故事极多，最出名的版本是「把灯笼拴在驴尾巴上，赶着驴沿悬崖来回走，模仿一艘随波起伏的船灯」。坦白说，这个具体画面更多是后世作家的演绎，档案里查得到实据的假灯案其实不多。但「不多」不代表没有——假灯案的定罪记录散见于英法的司法档案，而且相关法律的存在本身就说明了问题：1753 年英国议会立法，把洗劫遇险船只定为可判死刑的重罪，后来故意设置假灯诱船触礁也被明文列为重罪。立法者不会为纯粹的传说动用绞刑架。

用信息安全的语言说，假灯是一次「欺骗攻击」：伪造一个可信信源。灯塔体系花几百年建起来的那套签名机制（第四章的灯质、日标、海图登记），本质上就是一套反欺骗系统——灯质之所以要独一无二、要登记在案，防的不只是认错，还有伪造。

制度怎么把「黑暗里的生意」转正

压制沉船经济，光靠绞刑架是不够的——你不能一边让沿岸居民一贫如洗，一边指望他们对满滩货物不动心。真正的解法是把激励方向掉过来，核心是一招：**用合法的打捞奖励，替换非法的哄抢。**

现代海难救助制度的逻辑是：你把遇险船上的货救回来，货不是你的，但法律保证你得到一笔与货值挂钩的救助报酬——货越值钱、救得越险，报酬越高。救人还有专门的奖励。这样一来，一艘遇险的船对沿岸居民依然是「收入机会」，但实现机会的方式从「盼着它沉、等着抢」变成了「冲出去救」。同一个人性的算盘，被拨到了相反的方向。英国 1854 年的《商船法》还设立了专门的「沉船接收官」，冲上岸的货物必须先登记、等待认领，把「谁先捡到归谁」改成了「先登记、依法分」。

回头看，灯塔和救助制度是同一场战争的两条战线：灯塔负责让船**别沉**，救助制度负责让船沉了之后**别变成诱饵**。一个对抗风险，一个对抗人性。

一条更普遍的教训

这一章的寓意超出航海史：任何一个「提供正确信息」的系统，都会自动创造出「提供错误信息」的利润空间。灯塔有多值钱，假灯就有多值钱；定位系统越被信任，欺骗它的收益就越高。所以建设可信系统的下半场永远是防守战——这也正是为什么每本航海手册都告诫船长：灯光必须与海图、灯质、预计时间交叉验证，**任何单一信号都不值得全信。**

这句告诫也是通往下一章的桥：20 世纪，人类造出了灯塔的终极替代者——GPS。它精确、全天候、无处不在。船长们几乎全信了它。然后，问题就来了。

第九章 · GPS 时代，灯塔为什么还在

第八章结尾立了个靶子：GPS 精确到米、全天候、全球覆盖、几乎免费。按理说，这本书前八章讲的整个体系——塔、透镜、灯质、雾号、守塔人——都应该进博物馆了。过去四十年，这个「按理说」也确实兑现了大半：全球灯塔成批撤人、减灯、封存，上万座小灯标被拆除。

但如果你以为剩下的灯塔只是「留着当风景」，那就错了。最近十几年，航海界在做一件方向相反的事：**给 GPS 修备份**。而灯塔——这个最老的定位技术——恰恰是备份方案的一部分。要理解为什么，得先看 GPS 的阿喀琉斯之踵。

GPS 的信号，弱得超乎想象

GPS 卫星在两万公里高的轨道上，发射功率只有几十瓦——差不多一个灯泡。信号走完这两万公里抵达地面时，功率已经衰减到比一个灯泡在几百公里外的亮度还低，低到**埋在背景噪声之下**，手机里的芯片要靠复杂的数学处理才能把它从噪声里「捞」出来。

这个设计的后果是：压制它极其容易。一台功率几十块人民币级别的小干扰机，发出的噪声就足以让方圆几公里的 GPS 接收机全瞎。更阴险的是**欺骗**（spoofing）：干扰只是让你收不到，欺骗是伪造一个假 GPS 信号，让你的接收机算出一个**错误但看起来完全正常**的位置。

这不是理论。2017 年 6 月，黑海上二十多艘船的 GPS 不约而同地显示自己位于几十公里内陆的一座机场——后来确认是大规模的欺骗测试。朝鲜半岛的 GPS 干扰几乎年年发生，渔民和民航深受其害。波斯湾里，被欺骗信号「引路」偏航的商船也不止一艘。海员们尴尬地发现：第八章的假灯，在 21 世纪换了个频段回来了。

把鸡蛋放进一个篮子之后

更深的问题不在 GPS 本身，而在我们怎么用它。现代商船的电子海图、自动驾驶、避碰系统，全都默认吃 GPS 这一个位置源。当所有系统共享同一个输入时，**这个输入就成了单点故障**：它不坏则已，一坏就是所有系统一起错，而且错得步调一致——没有第二个声音告诉你「不对」。

这正是第一章锡利海难的现代翻版：算错位置不可怕，可怕的是「自信地算错」。区别只在于，当年是人在闭眼数数，今天是芯片在闭眼数数。

所以国际海事组织一直强制要求：船舶**不得依赖单一助航手段**。纸海图作业、雷达、目视瞭望，都必须保留。美国海军学院在 GPS 时代取消了天文导航课，又在 2011 年把它请了回来——理由是网络战时代，军官必须会在 GPS 全瞎的情况下用星星定位。听着像复古，其实是清醒。

灯塔的价值，在「跟 GPS 没有共同死因」

现在可以给「灯塔为什么还在」一个精确的回答了。好的备份不是「第二好」的系统，而是**和主系统不共享任何失效模式**的系统：

- **物理上独立**：GPS 靠两万公里外的卫星和脆弱的信号，灯塔靠五十米高的石头和一束光。干扰、欺骗、太阳风暴、卫星故障，伤不到灯塔一根毫毛。
- **主权上独立**：GPS 是美国空军运营的系统，理论上可以被降级或区域关闭；灯塔立在自家海岸上，谁也关不掉。
- **认知上独立**：GPS 给一个坐标，灯塔让你**亲眼看见**海岸线在你算出的位置上。欺骗信号骗得了芯片，骗不了眼睛。

与此同时，第五章「三层备份」的思路也在更新：各国在试验**增强罗兰**——一种地基、低频、大功率的无线电定位系统，功率比 GPS 信号强上千倍，想干扰它得竖起真正的发射塔，等于替 GPS 配了一个「吵不死」的替身。AIS 助航、雷达应答标继续升级。而灯塔，作为唯一**不用电也能用眼睛确认**的一层（日标白天直接看），被留了下来。

所以灯塔的存废逻辑很清楚：拆，是因为 GPS 把「主用」抢走了；留，是因为任何主用系统都需要一个「死法不同」的备份。灯塔从主角退成了保险丝——而保险丝的价值，恰恰体现在它永远不该被用上的那些年里。

答案渐渐完整

回到贯穿全书的问题：一束不能动的光，凭什么几百年来一直是大海上最可靠的「你在这里」？九章走下来，答案已经拼齐了：几何让它够得着（二章），透镜让它够亮（三章），编码让它认得准（四章），多层通道让它雾天也活着（五章），制度让它付得起（六章），守塔

人让它坏不了（七章），反欺骗让它信得过（八章），而「不共享死因」让它在卫星时代依然值得留着（本章）。

还剩最后一章：把这座石头塔拆开，看看它肚子里的哪几条原则，正在今天的软件、航天和城市系统里悄悄复活。

第十章 · 一束光教给工程师的事

九章走完，贯穿全书的问题已经有答案了。但这座石头塔值得拆到最后一层——因为它肚子几条原则，并没有随守塔人一起退役，而是悄悄搬进了今天的软件、飞机和城市系统里。认出它们，你以后再看到任何一种「灯塔」都会心一笑。

原则一：别替用户做判断，只提供无可争辩的事实

第一章说过，灯塔最「懒」的地方就是它最可靠的地方：它不分析、不建议、不针对任何船发消息，只广播一条事实——这束光从这个坐标发出。判断完全留给使用者。

今天的好系统都在学这一课。航空史上有一整类事故叫模式混乱：自动驾驶替飞行员「判断」了太多，飞行员搞不清系统现在到底在想什么，直到出事前几秒才发现人机理解完全错位。教训沉淀成一条设计准则：自动化越聪明，越要把底层的「原始事实」摆在显眼处，让飞行员（或任何操作者）永远能对系统说「让我自己看看」。灯塔式的信号——简单、原始、不解释——在仪表越复杂的系统里越宝贵。

原则二：让信号能被一眼认出

第四章的灯质，本质是「签名」：在充满噪声的背景里，必须能无歧义地认出「这是哪座塔」。现代系统里到处是灯质的转世：

- 每台设备的指示灯都在用「慢闪/快闪/常亮/变色」播报自己的状态——路由器上那几颗小灯，就是一座微缩灯塔。
- 分布式系统里，每个请求带着一个贯穿全程的追踪编号，出故障时拿它一对就知道请求死在哪一环——这就是给每条「船」发一张灯标表。
- 加密证书的指纹、软件的版本哈希，都是在回答同一个问题：「我凭什么认出你是对的，而不是假的？」

一条信号如果无法被认出、无法被区分，那它再亮也没用。设计任何会被人或机器「对名字」的信号时，先问自己：它在最差的条件下（浓雾、深夜、余光一瞥、日志洪流）还认得出来吗？

原则三：备份要和主系统「死法不同」

第九章的结论值得再强调一遍，因为它是当代系统最容易偷工减料的一条：冗余的价值不在「多一份」，而在「坏不到一起」。客机电传操纵系统用三套计算机，而且故意让不同承包商、用不同芯片写不同软件——为的是同一行 bug 不会同时出现在三套系统里。数据中心讲多地域容灾，真正难的不是「多买几台机器」，而是确认电源、网络、供应商、甚至「同一个运维脚本」都不会让两地同归于尽。灯塔对 GPS 的意义就是这句话的教科书：一束光，两万公里外任何故障都够不着它。

原则四：收费别硬来，去找咽喉要道

第六章的「进港交灯塔费」也是一条被反复转世的设计。你收不到「看风景费」，但可以收门票；你没法按「思考量」向搜索用户收费，但可以在广告主竞价的咽喉上收。好的商业模式往往不是「为价值定价」，而是找到那个**受益者绕不开、计量又便宜**的节点。系统设计里的计费、限流、鉴权，同样都设在咽喉要道上——API 网关就是软件世界的港口收费站。

原则五：凡是被信任的，都会引来伪造

第八章的假灯和第九章的 GPS 欺骗是同一条规律的两端：信号越被信任，伪造它的利润越高。所以现代系统把「永不全信单一信号」做成了本能——转账要二次确认，登录要多因素，导航要交叉验证。信任不是一次性颁发的，是要不断接受质询的。

尾声：下次路过海边

灯塔的故事，本质上是人类用几百年的时间，把「你在这里」这四个字越说越可靠的历史。为了让这四个字在风暴里、浓雾里、黑夜里都送达，人们交出了几何、光学、机械、制度、人性各自最聪明的那部分。

今天，这句话主要由天上的卫星替我们说，灯塔退成了保险丝。但下次你在夜里路过海岸，看到远处那道按时旋转的光，可以试着做一件水手们做了几百年的事：掏出手机秒表，数一数它几秒一个循环、一个循环闪几下，然后打开地图软件查一查它的灯质。

当节奏对上的那一刻，你刚刚完成了一次跨越三百年的握手——用一束不能动的光，回答了那个最古老的问题：

你在这里。

灯塔的作用 · 王建硕