

图说蒸汽机发展演变的三个阶段

张伟伟 太原科技大学力学系

《全球通史》作者L.S.斯塔夫里阿诺斯说^[1]，“蒸汽机的历史意义，无论怎样夸大也不为过”。“19世纪欧洲对世界的支配与其说是以其他任何一种手段或力量为基础，不如说是以蒸汽机为基础。”蒸汽机的出现使人类从依靠人力、畜力等原始动力中解脱了出来，实现了机器大生产，带领人类进入蒸汽时代。本文将蒸汽机的演变划分了三个重要阶段，并结合图例说明蒸汽机逐步改进和演变的过程。

第一阶段 纽卡门机

利用蒸汽实现机械做功最早可追溯到公元1世纪古希腊力学家希罗（Heron of Alexandria c. 10–c. 70 AD）发明的汽转球，它由一个空心球（连有两个出汽口）和一个密闭锅（加热水变成蒸汽）组成，在空心球和密闭锅之间用两根管子相连，同时也是空心球的支撑，如图1所示。当水沸腾后变成水蒸气经连接管进入到空心球中，此时蒸汽将从两个喷汽口喷出，在水蒸汽作用下空心球就转了起来成为汽转球。但汽转球只是一种玩具，

并没有什么实用价值，如图1所示。

引领17–19世纪工业革命的蒸汽机，起源于1679年法国物理学家帕平（Denis Papin, 1647–1713）发明的高压锅安全阀。帕平曾担任过英国著名化学家波义耳（Robert Boyle, 1627–1691）



图1 希罗的汽转球^[2]

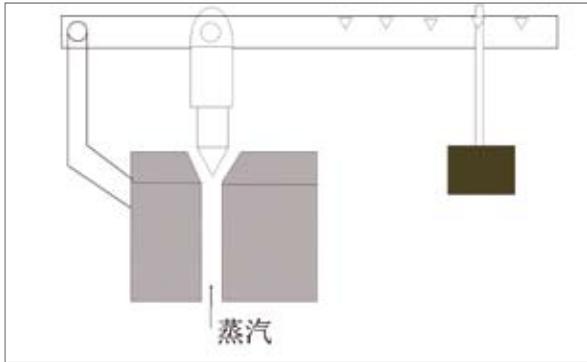
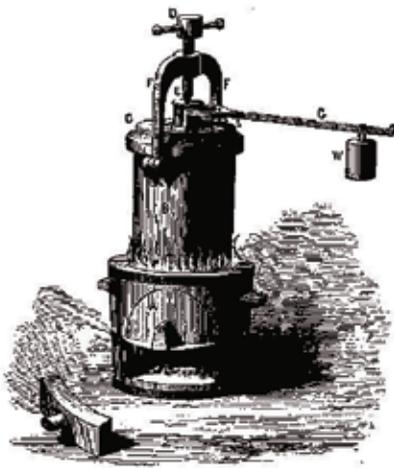


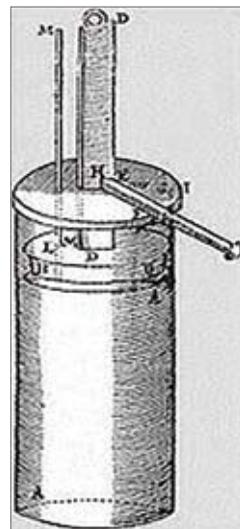
图2 杠杆式安全阀示意图

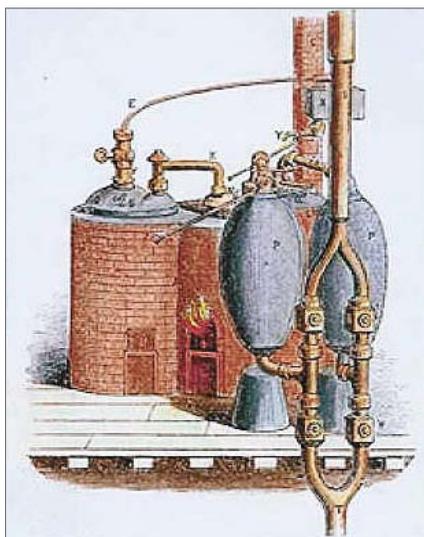
图3 帕平高压锅^[3]

的助手，当他认识到水的沸点会随压力升高而升高时，就想如果把加热容器密封起来，保证蒸汽不外泄，则容器内的压力增高，沸点也会超过100℃。如果把食物放在这样的容器里，一定会熟得更快、煮得更烂。但这样的密闭容器是非常危险的，因为当压力不断增加时，超过了容器的耐受压力，容器就会像炸弹一样爆炸造成安全事故。帕平创造性地设计出了杠杆式安全阀，如图2所示，这也是帕平高压锅的典型特点，如图3所示。

杠杆式安全阀设计原理简单、操作方便，可移动的砝码还可以实现对容器内压的控制。当压力超过设计值时，蒸汽推动活塞向上运动以排出部分蒸汽减少压力。正是这个可以在蒸汽压力下做功的活塞给了帕平发明蒸汽机的灵感。1690年帕平根据安全阀的工作原理发明了活塞式蒸汽机，并制造了世界上第一台汽缸模型^[3]。

图4所示为帕平活塞式蒸汽机，工作时蒸汽通过管子从下部进入汽缸，推动活塞向上运动。当活塞达到汽缸顶部时利用插销固定，停止加热并关闭蒸汽通道。向汽缸喷冷水使蒸汽冷凝在汽缸内形成真空，然后拔取固定活塞的插销，在大气压力下活塞慢慢向下运动，通过杠杆提起重物。在1704年后，帕平在德国费克哈根（Veckerhagen）（现在的赖恩哈茨哈根，Reinhardshagen）的一家铸造厂铸造了全世界第一台蒸汽缸。但帕平只是对活塞式蒸汽机进行了原理性的探讨，由于制造水平的限制，该蒸汽机并没有应用于工业生产。

图4 帕平活塞式蒸汽机^[3]

图5 塞维利蒸汽机^[4]

后来，英国发明家和工程师塞维利（Thomas Savery, 1650–1715）仔细对帕平活塞式蒸汽机进行了研究。塞维利意识到了制造良好密闭性活塞的困难，当时的锻造技术实际上仍依靠铁匠的手工制造。塞维利舍去了帕平的活塞结构，设计了两个部分：一是锅炉，二是密闭的工作容器。

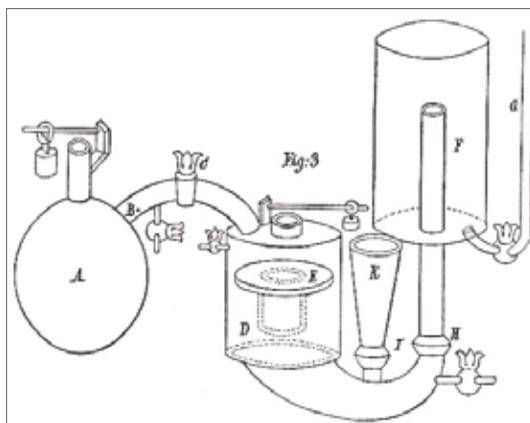
其工作原理是：先通过锅炉把水加热，使蒸汽把工作容器充满排出空气，然后关闭入汽孔，使工作容器中水蒸气冷凝而形成真空，当工作容器与矿井下的水相连通时，在外部大气压作用下就可以把水抽到高处，它的原理和我们用吸管吸饮料是一样的。为了把水送到更高的地方，把抽水管关闭，打开向上的送水管，再次将蒸汽引入工作容器依靠蒸汽压力把水送到更高的地方，这就是塞维利机（见图5）。

塞维利于1698年获得了蒸汽机的第1项专利，并将其命名为“矿山之友”。塞维利机成为第一个工业应用的蒸汽机，但塞维利机有四个严重的问题^[4]：（1）每次抽水都会有大量的热量被浪

费，效率很低。（2）在第二个阶段依靠高压蒸汽将水输送到高处，这使机器部件，尤其是焊接部件需要承受高压，由于材料和制造工艺的欠缺致使机器需要频繁维修。（3）虽然理论上使用的主动蒸汽压力提水没有高度限制，但在实际操作中存在很大困难。为了从深井中打出干净水，需要一系列的压力机。（4）由于塞维利机的工作原理，最深的抽水高度约为30英尺（9.1米）。这就要求塞维利机只能在水面不远的地方安装、使用和维护。

当塞维利将他的“矿山之友”在皇家学会展出时，请帕平予以鉴定（此时帕平已成为皇家学会的会员），帕平提出了重大的改进意见，但塞维利不同意改进，他们在使用还是不使用活塞上存在较大的分歧。为了验证自己是正确的，帕平在塞维利机的基础上重新设计了蒸汽机。如图6所示，A是带安全阀的锅炉，蒸汽进入汽缸D推动活塞E压缩F中的空气，水从水管G输送到高处，输送的水从漏斗K处注入（见图6）。

当帕平要求皇家学会给予15英镑来改进锅炉，以证明新设计比塞维利机要优越时，塞维利从中百般阻挠，致使帕平的合理要求遭到拒绝

图6 1707年帕平重新设计了蒸汽机^[5]

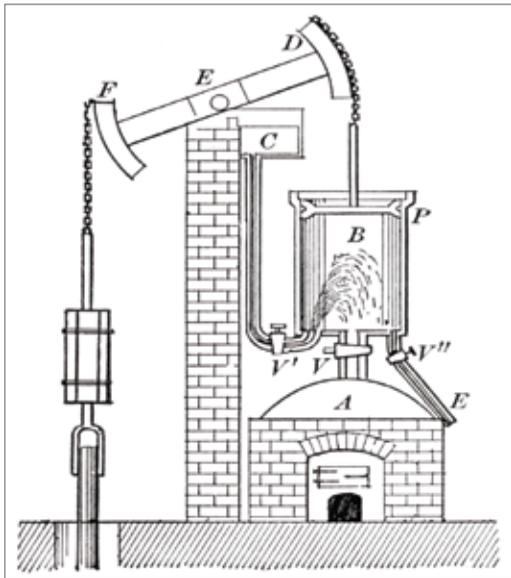


图7 纽卡门机^[8]

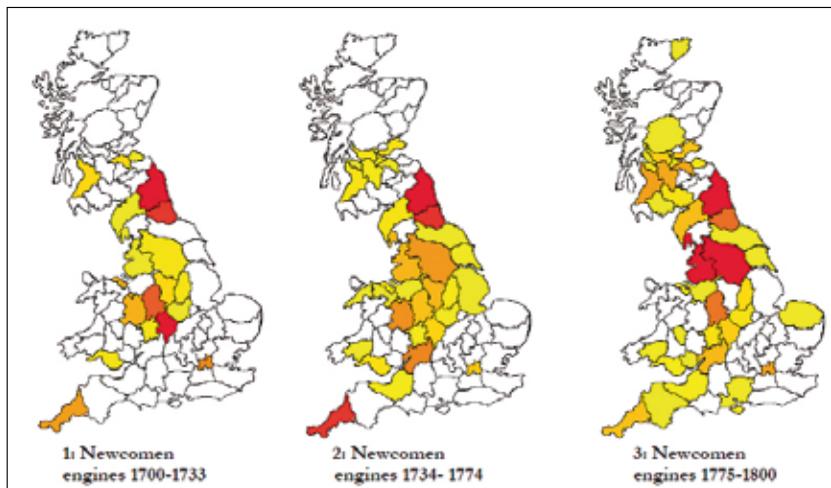
^[6]。从两人努力的不同侧面可以看出，帕平倾向于使用活塞提高蒸汽机的工作效率，而塞维利则更看重活塞在加工制造上的困难，从而拒绝接受帕平的建议。正是两人这样的不同着眼点造成了两人的矛盾。最后两人的矛盾由英国发明家纽卡门进行了协调统一。

纽卡门 (Thomas Newcomen, 1664-1729) 的资料很少，虽说职业是锻工，实际上在当时和我们熟知的铁匠差不多。纽卡门了解蒸汽机是从塞维利那里开始的。纽卡门与塞维利家相距15英里，纽卡门曾前往塞维利家拜访塞维利，并成为塞维利的员工^[7]，他被允许在自己家的后院复制一台塞维利机进行研究和改进。纽卡门不负众望，他综合了帕平活塞和塞维利机快速冷凝的优点，于1712

年制造出了纽卡门机，如图7所示。在塞维利机的基础上，纽卡门做了两项改进：首先，引入帕平的活塞，使塞维利机提供热力转变为提供动力；其次，将蒸汽机与工作机（即抽水机）分离，使蒸汽机真正成为动力机。蒸汽机和工作机的分离另一个好处在于可以将锅炉的容积做得大于汽缸容积，这样可以输送更多的蒸汽以提高功率。

1712到1733年的20年间，大约125台纽卡门蒸汽机被安装使用在英国的重要矿区和欧洲大陆的工业密集地区^[9]，如图8所示。纽卡门机成为蒸汽机发展历史上的里程碑。后来瓦特在蒸汽机方面的工作主要是对纽卡门机进行了一系列的改进，以提高效率、并发明了控制装置调速器和示工器。纽卡门机诞生后受到了广泛的欢迎，成为蒸汽机的主流设计，这种情况一直到18世纪末它为瓦特蒸汽机逐渐替代。

但可惜的是，由于当时申请专利需要昂贵的费用，纽卡门并没有申请专利，这或许也为纽卡门机的广泛使用提供了条件，纽卡门机成为煤矿抽水的必备设备，以至于大学里都在教授纽卡门



(a)1700-1733 (b)1734-1774 (c)1775-1800

图8 18世纪纽卡门机的地理分布^[9]

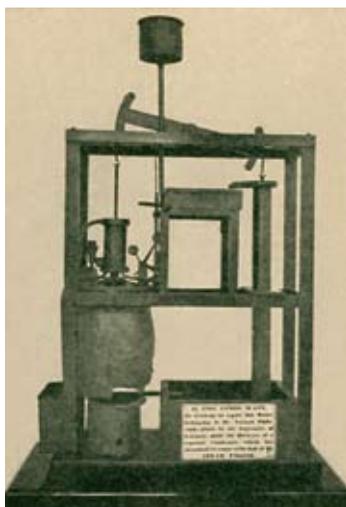


图9 瓦特实验使用的纽卡门模型机^[11]

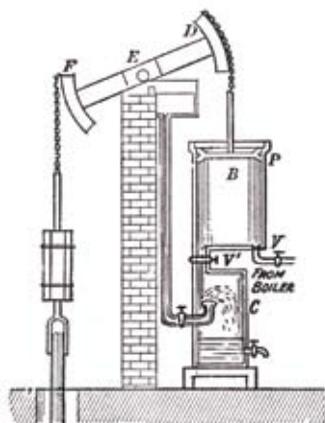


图10 冷凝器分离式蒸汽机^[12]

机的工作原理。纽卡门机的出现标志着蒸汽机革新中第一阶段工作的完成。纽卡门机一直使用到18世纪60年代，瓦特对纽卡门机的改进标志着蒸汽机的演变进入第二阶段。

第二阶段 瓦特对蒸汽机的改进

瓦特（James Watt，1736–1819）与蒸汽机结缘，得益于格拉斯哥大学（University of Glasgow）的三位教授，Joseph Black和Adam Smith，以及后来的John Robison，他们为瓦特提供了一份制作天文仪器的工作，并提供了一个小车间从事实验工作^[10]。1759年，John Robison让瓦特的注意力转向蒸汽动力机，真正的机会是1763年瓦特被要求去修理一台学校的纽卡门教学模型机，此前送去伦敦维修没有修好，但瓦特很快就修好了。瓦特的可贵之处在于他修好之后，还对其工作原理、热机效率、制造工艺等一系列问题进行了深入思考和研究。在经过很多实验后（图9所示为瓦特实验用的纽卡门模型机），瓦特发现汽缸每次循环中有大约3/4的蒸汽热量被白白地浪费，主要原因是当冷水注入到汽缸中时，汽缸温度和压力降低，在下一循环中不得不重新加热，这样反复加热和冷却汽缸造成了蒸汽机转化机械能效率低下。此外，纽卡门机由于每次循环都向汽缸内喷入冷水，会造成不能连续工作。

1769年瓦特考虑如果单独设计一个冷凝装置，就不需要使汽缸的温度降到常温再重新加热，这样就可以提高热机效率，按照他的设计可将蒸汽机的效率提高3倍。依照这一思路，瓦特设计了带有分离式冷凝器的蒸汽机，如图10所示。汽缸与冷凝器分开，汽缸成为高温热源，冷凝器作为低温热源。瓦特还设计了向冷凝器喷入冷水的联动控制装置，这样蒸汽机就可以连续工作，不但节省了大量的燃料，也可使蒸汽机的工作不再断断续续，节省时间从而大大提高了蒸汽机的效率。1769年瓦特生产了带有分离式冷凝器的蒸汽机，并以分离式冷凝器申请了他的第1项专利。

1775年，瓦特与合伙人Soho铸造厂的老板马修·博尔顿（Matthew Boulton, 1728–1809）合作成立了“博尔顿-瓦特公司”，并将分离式冷凝蒸汽机投入生产，其煤耗不到纽卡门机的1/3^[13]。然而，销路并不好，此时瓦特意识到提高效率

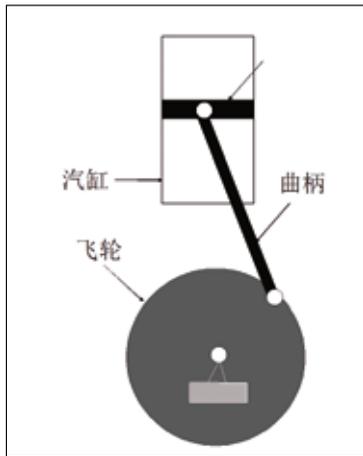
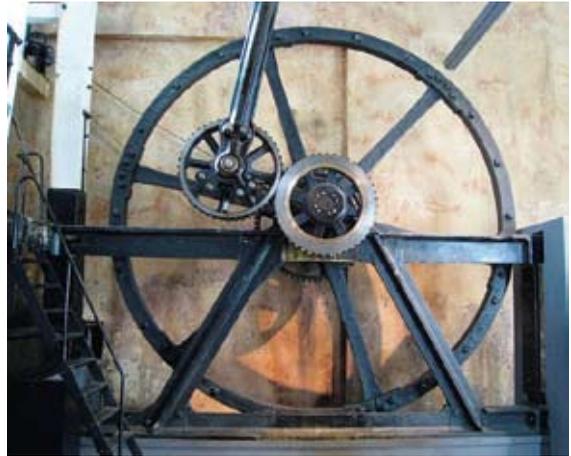


图11 James Pickard曲柄机构和飞轮的装置示意图

图12 瓦特“太阳和行星”齿轮联动装置^[15]

已不是蒸汽机的主要矛盾，而只能做往返运动的活塞才是制约蒸汽机发展的弊端^[14]。1780年，英国发明家James Pickard申请了联合曲柄机构和飞轮的装置将活塞往复运动转变为圆周运动的专利（图11），当瓦特提出希望使用该专利时，Pickard提出共享分离式冷凝器专利的要求，瓦特断然拒绝。1781年，瓦特公司的雇员威廉·默多克（William Murdoch）发明了一种称为“太阳与行星”的曲柄齿轮传动系统（图12），并以瓦特的名义成功申请了专利，绕开了Pickard的专利保护。

但很明显“太阳与行星”系统在效率方面不如曲柄机构，1794年，Pickard的专利到期后，博尔顿和瓦特重新采用了经济上和技术上都更优的曲柄。输出旋转运动的瓦特蒸汽机，才成为真正的动力机。

1781年，瓦特成功申请了连续旋转工作的蒸汽机专利和双向汽缸专利。双向汽缸（见图13）在活塞两侧进入蒸汽，可大大提高蒸汽机效率。1782年取得了复合式蒸汽机专利，可以连接2个或更多的蒸汽机联合作。同年，伊特鲁里亚一家

陶瓷厂大规模采用博尔顿-瓦特铸造厂生产的联协式蒸汽机和伯明翰厂生产的动力机床，进行机械化陶瓷生产。

此后瓦特又专注于蒸汽机的控制问题。1784年，瓦特申请了平行运动机构（parallel motion）的专利^[16]（见图14），以保证双向汽缸的有效控制。同时为了保证蒸汽机的平稳运行，1788年申请了离心式调速器的专利^[13]（见图15），调速器

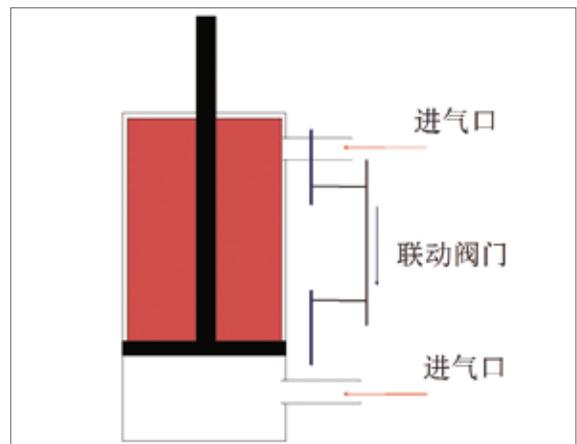


图13 双向汽缸示意图

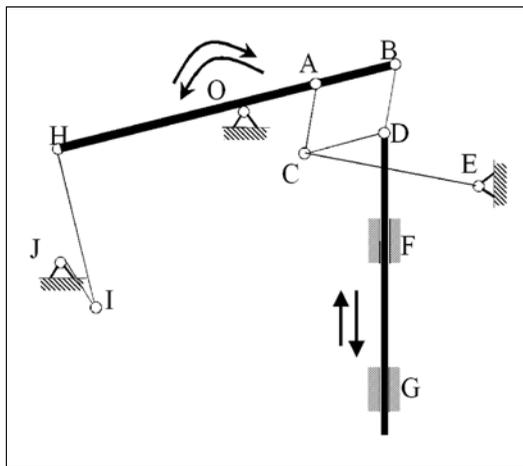


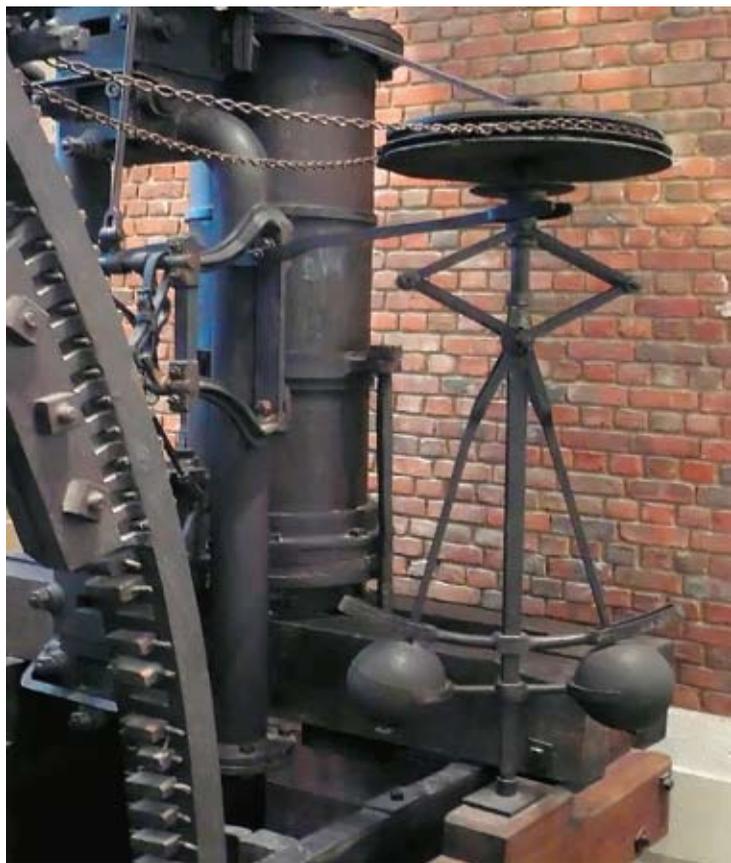
图14 平行运动连杆机构

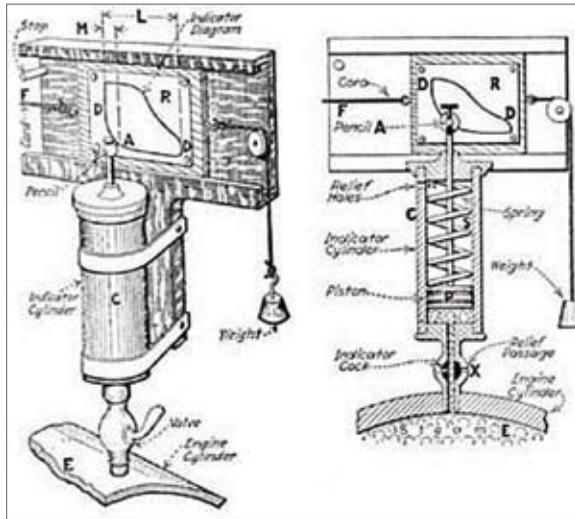
是一个反馈系统，无论载荷和燃料如何，都保证蒸汽机以近似恒速运转，这为蒸汽机的广泛应用提供了保障。

实现功能只是蒸汽机的基本要求，能够对蒸汽机进行精确控制才标志着工业革命的真正开始。在平行运动连杆机构、调速器之后，大约1800年瓦特发明了蒸汽机示工器，也有学者认为示工器是瓦特的员工John Southern发明的^[18]（见图16）。示工器的意义非常巨大，它对于工程师就像是内科医生的听诊器，可以发现机器内部系统的隐蔽工作，并可实时监测机器内部工作的异常情况，还可以记录蒸汽机的实时功率。可方便地绘制汽缸内压力与体积的关系曲线，这为热力学气体状态方程研究提供了基础。蒸汽机示工器实现了记录汽缸在工作中各状态点的压力，以及压力改变速率，可对机械效率、机器的工作细节问题进行实时监控。这对于降低能耗，减少故障，缩减维修费用，降低折旧率以及延长蒸汽机寿命等多个方面具有重要意义^[19]。

瓦特的工作代表了蒸汽机演变中的第二个阶

段。在瓦特研制蒸汽机的过程中，Soho铸造厂的博尔顿起了关键性的作用。1794年，瓦特与博尔顿合伙组建了专门制造蒸汽机的公司，保证了蒸汽机的研究经费，事实上瓦特在博尔顿的经营下，通过专利税收益很快就成了富翁。到1824年共生产了1165台瓦特蒸汽机（见图17），纺织、采矿、冶金、造纸等工业部门都先后采用蒸汽机作为动力。瓦特与他的前人相比，他对蒸汽机的改进不仅在于结构和制造工艺上的完善，同时还完成了许多蒸汽机的控制装置的设计，使蒸汽机更加趋于稳定工作。在这一过程中，我们过多地强调了瓦特的工作，实际上瓦特的合伙人博尔顿、他们的员工（如默多克）、当时的一些化学

图15 离心式调速器^[17]

图16 瓦特蒸汽机示工器^[18]

家、物理学家（如格拉斯哥大学的三位教授，以及月光社（Moonlight Club）的一些知名人士）的作用不容忽视，应该说在瓦特天才般的发明创造能力之上，良好的人际关系也是瓦特成功的重要条件。

第三阶段 高压蒸汽机的发展

蒸汽机的雏形来源于帕平高压锅的安全阀，一个显见的结论就是压力越大越可能提供更大的动力，但由于当时材料和制造工艺低下，初期蒸汽机的蒸汽压力仅为0.11~0.13 MPa，均为低压蒸汽机，瓦特蒸汽机也属于低压蒸汽机。另一方面，博尔顿和瓦特在蒸汽机发明中成功，凭借蒸汽机的各项专利几乎形成了对蒸汽机技术的垄断，成为高压蒸汽机发展的障碍。1800年瓦特蒸汽机专利基本权利期满后，高压蒸汽机的研发与应用标志着蒸汽机进入了第三个发展阶段。

高压蒸汽机的发明者特里维希克（Richard Trevithick, 1771-1833）1797年积极倡导研发高压蒸汽机，以避免使用分离冷凝器支付的高

昂专利税。在1797-1798年期间，特里维希克住在雷德鲁思（Redruth）时与瓦特的员工默多克（William Murdoch）是邻居，在特里维希克的要求下，默多克展示了他的蒸汽汽车模型。这可能促成了特里维希克研究高压蒸汽机。1799年在他儿子的建议下开始高压蒸汽机。特里维希克不使用冷凝器，设计了小体积汽缸，以节省空间和重量。毫无疑问，一种结构紧凑、轻量化的高压蒸汽机在运输货物方面具有重大的优势。

瓦特蒸汽机专利基本权利期满后（1800年），1802年，特里维希克就发明出了高压牵引蒸汽机，并申请了专利。这是世界上第一台实用性轮轨蒸汽机车，他的蒸汽机车在结构上初步具备了早期蒸汽机车的雏形，例如：机车由锅炉、烟囱、汽缸、动轮、摇杆、连杆、飞轮等部件组成^[20]（见图18）。1804年，特里维希克制造出了可用的蒸汽机车，并于1808年在伦敦建造了一条封闭的环形铁路进行演示以引起矿主的注意。并将该火车命名为“谁能逮到我（the Catch-me-

图17 瓦特双向蒸汽机复制品^[10]，马德里理工大学

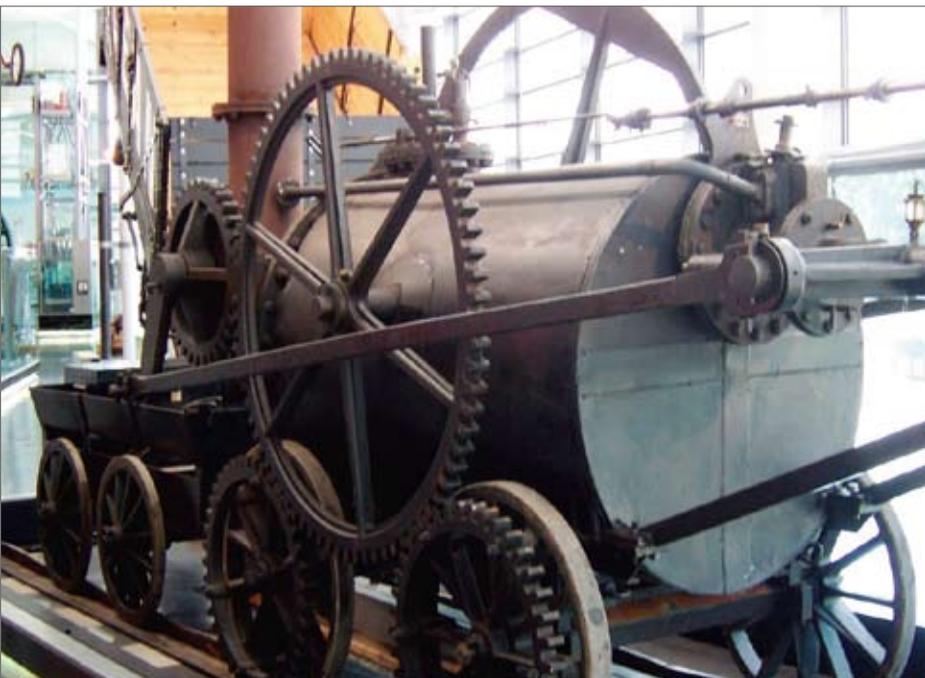


图18 特里维希克蒸汽机车^[20]

who-can)”，时速12英里（约19.32千米）（见图19）。然而，由于蒸汽机车本身和它牵引的货物太沉重了，生铁铸成的铁轨经常发生断裂，于是矿山的主人拒绝了特里维希克的蒸汽机车，还是决定用老办法马拉货车来运矿石。

几乎与特里维希克同时，美国工程师、发明家埃文思于1801年独立制造出了高压蒸汽机。早在18世纪80年代，埃文思就开始思考蒸汽机动力应用于运输，90年代发展出了蒸汽车厢，到1801年埃文思开始决定实现自己梦寐以求的理想。他的工作思路来源于早期瓦特的员工威廉姆·默多克的设计，直接将蒸汽压力转变为旋转动力^[21]。

如图20所示，围绕圆心的活塞运动可推动中心摇杆做圆周运动。但默多克设计的依然是低压蒸汽机，在推动沉重的飞轮时显得力不从心。

埃文思决定改进默多克的设计，他的目标是制造小体积但输出功率相当或大于低压蒸汽机，融合了Grasshopper梁蒸汽机（见图21）、双向汽缸（见图13）的优点，通过四个气阀独立控制一个凸轮运动提高了输出功率，并成功应用于蒸汽机车和蒸汽艇，与巨大的冷凝蒸汽机相比，具有体积小便于制造和维护的优点，适合于不同场合的工业应用。

尽管埃文思蒸汽机最初只有5马力，小于传统低压蒸汽机的12马力，但它的体积只有传统蒸汽机的1/25。这引起了人们的极大关注，埃

文思在商店演示他的蒸汽机时吸引了数千人前来观看，费城新闻Aurora报进行了报道，称这是蒸汽机历史的新时代（a new era in the history of the steam engine）。

特里维希克和埃文思发展高压蒸汽机都希望将其应用于运输业，但真正完成这一使命的是被誉为“铁路之父”的英国发明家斯蒂芬森（George Stephenson, 1781-1848）。他在1814年发明了一台蒸汽机车布拉策号（Blutcher）（见图23），时速6.4千米/小时。它以普鲁士将军Gebhard Leberecht von Blücher命名，1815年在滑铁卢战役中Blutcher急行军及时增援友军并击败了拿破仑。1830年，斯蒂芬森建成了世界上第一条实用的城际铁轨，利物浦-曼彻斯特铁路（Liverpool and Manchester Railway），推动了铁路运输业的发展。

在蒸汽机的发展历史上，最初的纽卡门机效率不足0.5%，瓦特初期连续运转的蒸汽机按燃料

热值计总效率不超过3%，最好时达到了4.5%^[13]。到1840年，最好的凝汽式蒸汽机总效率可达8%，似乎已经达到低压蒸汽机的极限。蒸汽机效率的继续提高有赖于高压蒸汽机的出现。我们知道大气压力约0.101 MPa，低压蒸汽机压力一般不超过0.13 MPa。19世纪初期的蒸汽机达到0.35~0.7 MPa，试验中可达5.6 MPa；20世纪20年代达6~10 MPa。在蒸汽温度上，19世纪末还不超过250℃，而到20世纪30年代曾达到450~480℃。蒸汽压力和温度的提高，极大地提高了蒸汽机的效率，高压蒸汽机的出现使热机效率提高到了20%以上^[26]。

提高热机效率可以说是蒸汽机发展的主线，起初人们从材料、机械结构、制造工艺、热机工作物质等方面进行了不断的探索。有两个问题引起了当时许多工程师和科学家的关注：(1) 热机效率有没有一个极限；(2) 什么样的热机工作物质最理想。法国军事工程师和物理学家，被誉为“热力学之父”^[27]的卡诺(Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796–1832)从理论上解释了上述两个问题从而奠定了他在热力学中的地位。在他短暂的一生中(36岁时死于霍乱)，唯一的著作是发表于1824年的《关于火的动力》(Reflections on the Motive Power of Fire)，在他的论文中提出了卡诺循环，并依此构造了理想热机模型(卡诺热机)，指出热机效率在理论上等于

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

其中， η 表示热机效率， T_2 表示低温热源， T_1 表示高温热源。这就说明在理想情况下，热机效率与所选用的工作物质无关，仅与工作物质的低温和高温热源温度相关。

我们知道提高蒸汽压力，在同等体积情

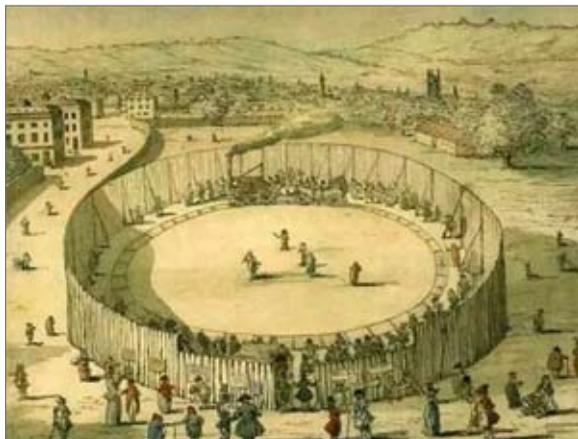


图19 特里维希克测试蒸汽机车的圆形轨道^[20]

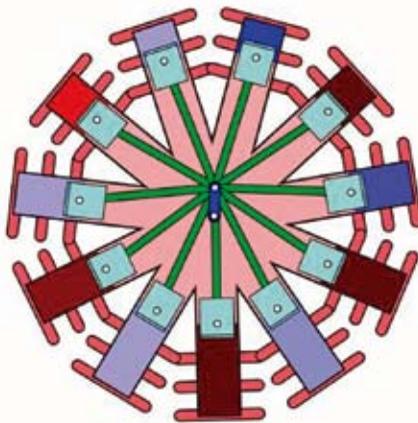


图20 旋转动力蒸汽机示意图^[22]

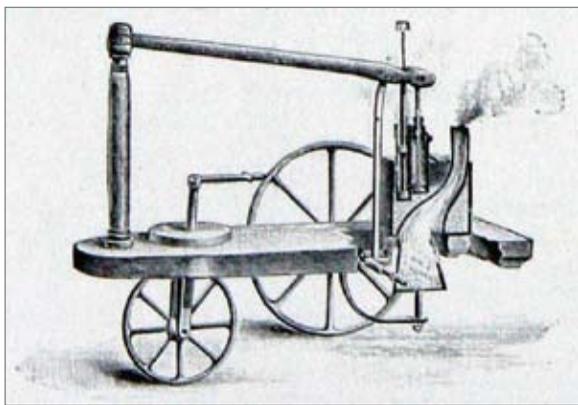


图21 默多克Grasshopper梁蒸汽车辆^[23]

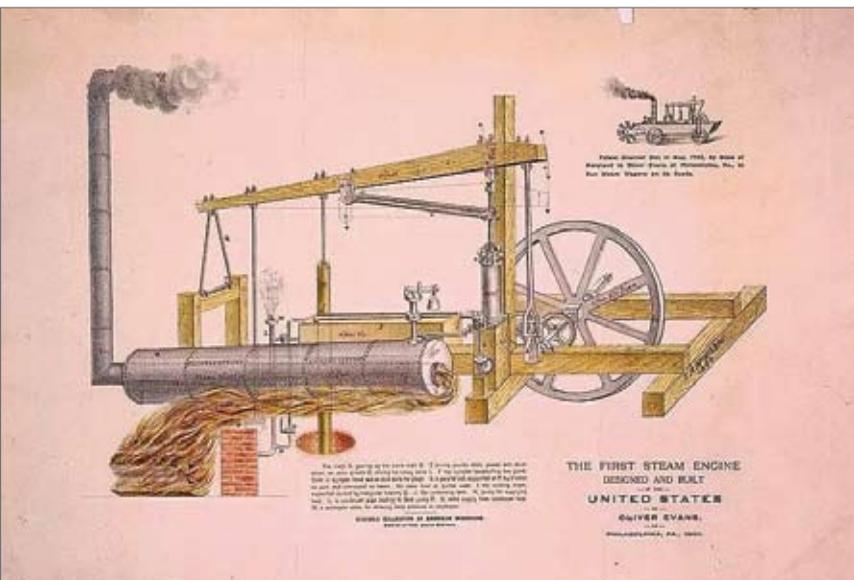


图22 埃文思高压蒸汽机和水陆两用船^[21]

况下, 可得到较高的温度, 因此高压蒸汽机的热机效率要比低压蒸汽机效率高。但人们普遍了解卡诺和他的理论, 是在卡诺去世46年后(1878年), 他的论文被克拉珀龙(Benoit Pierre Emile Clapeyron, 1799-1864)、开尔文(原名William Thomson, 后改名为Lord Kelvin, 1824-1907)和克劳修斯(Rudolf Julius Emanuel Clausius, 1822-1888)等人关注并再次出版^[28]。克拉珀龙结合瓦特示工器P-V曲线和卡诺循环, 提出理想气体状态方程, 并解释了卡诺循环; 开尔文从卡诺循环提出绝对温标, 发展了热力学第二定律; 克劳修斯重新解释了卡诺循环并首次提出热力学第二定律的基本概念, 在热力学中引进熵的概念。卡诺热机的提出为提高热机效率提供了理论依据, 标志着蒸汽机第三阶段的完成。此后, 人们便着手研发耐高温高压的材料和结构, 以提高热机效率。

如今, 广泛应用于火电领域的蒸汽轮机正是

卡诺热机理论的工程应用, 通过提高蒸汽压力、温度, 达到提高效率和减少二氧化碳排放的目的。蒸汽轮机也称涡轮蒸汽机, 它利用过热蒸汽通过汽轮机叶片(见图24)推动转子转动, 转子再带动发电机发电, 这里已经不再是活塞的往复运动, 其工作原理与风车相似, 只是结构上要复杂得多。

在蒸汽使用上, 以水的相平衡点(压力22.129 MPa、温度374.15 °C为水的临界点, 此时水和蒸汽具有相同密度)为界^[30], 若锅炉压力和温度高于临界压力和临界温度称为超临界锅炉; 压力低于临界

压力, 温度在沸点与临界温度之间就叫亚临界锅炉; 当炉内蒸汽温度高于600 °C, 蒸汽压力不低于25 MPa被称为超超临界。锅炉参数从低压、高压, 发展到亚临界、超临界, 乃至超超临界, 正是卡诺热机理论的实践证明。图25充分说明了蒸汽参数对于提高效率, 减少CO₂排放具有重要意义。

当今发展温度在700 °C和/或压力在35 MPa以

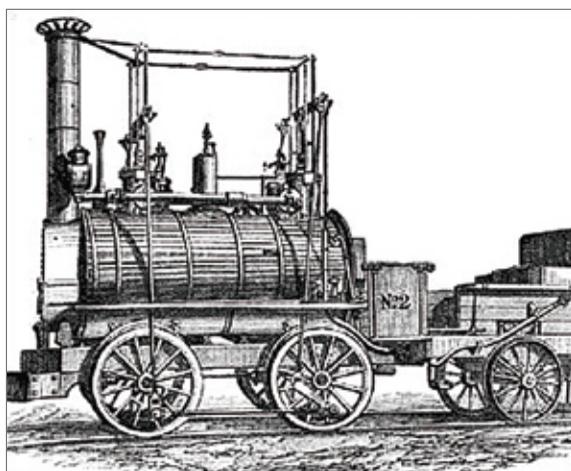


图23 斯蒂芬森1816年制造的蒸汽机车^[25]

上的高超超临界（HUSC或AUSC）燃煤机组已成为世界各国竞相发展的重点^[31]。2011年开始，我国已经致力于研究700℃的高超超临界技术，发电效率将提高到48%至50%，二氧化碳排放将减少14%，是我国优化调整以煤为主电力结构的重要举措^[32,33]（说明：在别的文献中，上述参数略有不同）。相信随着材料技术和加工工艺的不断提

器给蒸汽机带来革命性的变革，并引发了举世瞩目的工业革命时，高压蒸汽机又取消了冷凝器，并使蒸汽机向紧凑、更高效发展。这说明冷凝器这一伟大创新也有其适用条件，科技创新并非“找对路然后走下去”那么简单。在蒸汽机发展的前两个阶段，人们主要对机械结构、材料、施工工艺、锅炉工质不断试验，讨论蒸汽机的效率

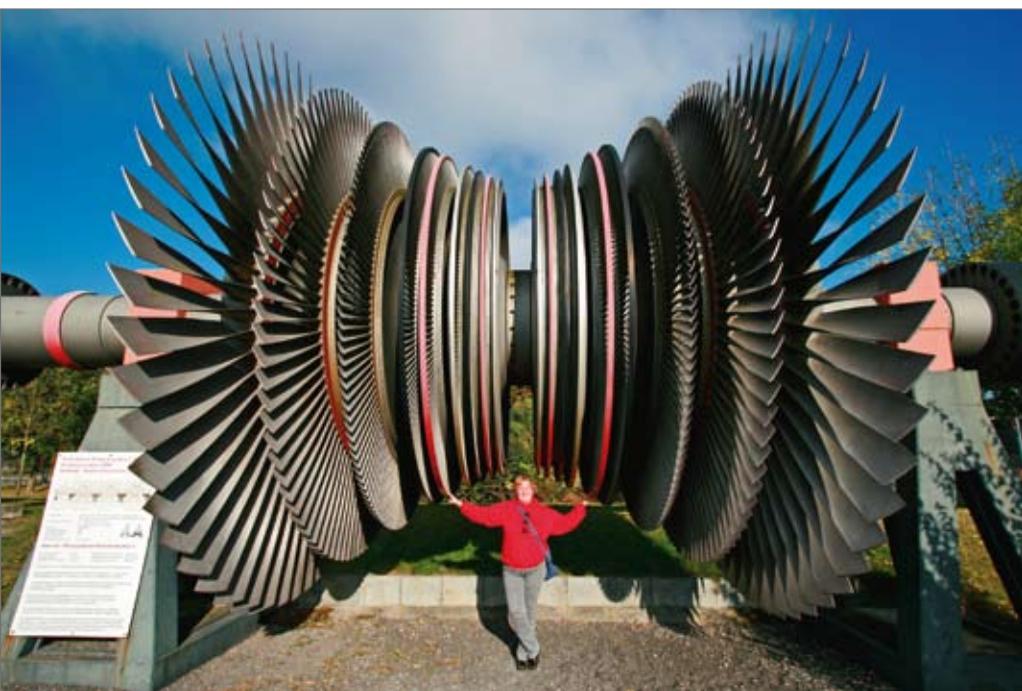


图24 巨大的汽轮机叶片^[29]，蒸汽机从中间进入向两边流过叶片产生转子的转动

升，人类将不断地研发出更为高效的热机。

结束语

蒸汽机使人类从利用人力、畜力中解放出来，实现了机器大生产，正如斯塔夫里阿诺斯所说：“蒸汽机的历史意义，无论怎样夸大也不为过。”在蒸汽机的革新过程中，我们不禁惊叹科技的进步似乎不会有停止的时刻。当纽卡门机出现时，人们一定以为人类已经迈进一个新时代，谁曾想瓦特一个简单的分离式冷凝器又将蒸汽机推向新的发展阶段。当我们还在感慨分离式冷凝

的极限，以及取得这一极限的最优参数。但纯粹的技术革新不可能胜任这一工作，卡诺理想热机理论的出现从根本上揭示了影响热机效率的真正原因，为蒸汽机效率的进一步提高指明了方向。科学和技术如同支撑人类文明前行的一对车轮，两者协调发展时就体现出人类文明进程的和谐，当某一方偏弱时就可能遭遇技术瓶颈或者理论陷阱。

就蒸汽机的发展而言，作为新式蒸汽机代表的汽轮机，在火力发电行业中重新焕发了蒸

亚临界	超临界	超超临界	AD700
压力、温度参数			
22.129MP, 374.15°C	25MP, 600°C	35MP, 700°C	
热机效率			
约 40%	约 41.5%	42%~46%	48%~50%
CO ₂ 排放			
基准	减少约 2.4%	减少约 4.1%~6.5%	减少约 10%

图25 提高蒸汽参数的节能减排意义

汽机的魅力，并以超高温、超高压的工作方式谱写着新时代蒸汽机的凯歌。这又要求人类在高温材料、冶金工艺、制造工艺等相关技术方面的发展。从蒸汽机发展演变的历程来看，虽然人类早已走出蒸汽时代，进入了信息高速发展的21世纪，但蒸汽机的变革远没有停止，新理论、新材料、新的加工工艺的不断变革又必将引发蒸汽机进一步的发展。这也说明科学与技术的进步没有终点，人类探索的脚步也永远不会停止！

参考文献

- [1] 斯塔夫里阿诺斯[美]. 全球通史. 北京大学出版社, 2006.
- [2] Wikipedia. Hero of Alexandria. https://en.wikipedia.org/wiki/Hero_of_Alexandria
- [3] Wikipedia. Denis Papin. https://en.wikipedia.org/wiki/Denis_Papin
- [4] Wikipedia. Thomas Savery. https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery
- [5] <http://chestofbooks.com/crafts/scientific-american/XXXVI-8/Papin-s-Steam-Engine.html>
- [6] 百度百科. 丹尼尔·帕平 http://baike.baidu.com/link?url=yUdX5l6092nE1WOhCYMj8ago2kxdDPh8MKJBYpODO16Jd9SEKwikAu4PPZnypng7zQla0QrYsP6L_iAzPcdzMK
- [7] <http://inventors.about.com/od/nstartinventors/a/Newcomen.htm>
- [8] Wikipedia. Thomas Newcomen. https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Newcomen
- [9] Alessandro Nuvolari, Bart Verspagen and Nick von Tunzelmann. The Diffusion of the steam engine in Eighteenth-century Britain. 50th Annual North American Meetings of the Regional Science Association international. Philadelphia, 2003.
- [10] Wikipedia. James Watt. https://en.wikipedia.org/wiki/James_Watt
- [11] Wikipedia. Watt steam engine. https://en.wikipedia.org/wiki/Watt_steam_engine
- [12] Wikipedia. Beam engine. https://en.wikipedia.org/wiki/Beam_engine
- [13] 迟红刚, 徐飞. 瓦特蒸汽机技术创新的社会视角分析. 科学与社会. 2015, 5(4): 102-114.
- [14] 阮小黑, 韦锋. 一场官司推动了一次技术革命——浅谈专利制度在人类技术发展史上的作用. 广东科技. 2004(7): 59-61
- [15] Wikipedia. Sun and planet gear. https://en.wikipedia.org/wiki/Sun_and_planet_gear
- [16] Wikipedia. Parallel motion. https://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_motion
- [17] Wikipedia. Centrifugal governor. https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor

- [18] Bruce L. Babcock. The Story of the Steam Engine Indicator. <http://www.farmcollector.com/steam-traction/story-steam-engine-indicator.aspx?SlideShow=2>
- [19] John Walter. The engine indicator, The autographic engine indicator from Watt to Richards. Nevill Publishing, 2013.
- [20] Wikipedia. Richard Trevithick. https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Trevithick
- [21] Wikipedia. Oliver Evans. https://en.wikipedia.org/wiki/Oliver_Evans
- [22] Wikipedia. Rotary engine. https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_engine
- [23] Grace's Guide to British Industrial History. http://www.gracesguide.co.uk/William_Murdoch
- [24] Wikipedia. Grasshopper beam engine. https://en.wikipedia.org/wiki/Grasshopper_beam_engine
- [25] Wikipedia. George Stephenson. https://en.wikipedia.org/wiki/George_Stephenson
- [26] 蒸汽机. <http://baike.mysteel.com/doc/view/28586.html>
- [27] Wikipedia. Nicolas L é onard Sadi Carnot. https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot
- [28] 百度百科, 卡诺 http://baike.baidu.com/link?url=E_IzGlt5gZFxNytBfPIBsGbxGDdCYfN4QIGuiqZ_uortmDFN80RDBuINyyKAx3H9ocRCbnGV AiriKIz2wNMLxjrv49jxKg-vXEoOSCufQuoRVvph0r7o9BdfDpUOCtHOTLZidcpej3kRh23-UzVbnvXATJ1oZmVQWEG6mu24Aa
- [29] Wikipedia. Steam turbine. https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_turbine
- [30] 百度百科, 超超临界机组 http://baike.baidu.com/link?url=TvjXJb0m-2vRVImrK_vLp6CpPO-5a96jbaQ9L6rKxb0- o5COP_cIWLd-hNo4HhOrbcvPqpLmtO0NBLw02_10y_
- [31] 黄瓿, 彭泽瑛. 700℃高超超临界技术的经济得益分析. 热力透平, 2010, 39(3): 170-174.
- [32] http://news.163.com/11/0625/08/77CM3ALO00014JB5_2.html
- [33] 黄瓿. 以创新技术提高700℃高超超临界汽轮机的性价比. 上海电气技术, 2013, 6(4): 1-7.