

理论力学习题背后的故事 (1)

—— 蒸汽机的历史

高云峰¹⁾

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

如果你去参观一个复杂机器, 面对众多的零部件, 如何发现其中最重要的环节而得到启发? 如果你做习题, 如何在众多习题的背后领悟相关的道理? 在理论力学教材或辅导中, 大量的习题背后都有着实际的应用背景, 如果我们梳理一下, 可以从习题背后发现很多值得思考的问题, 视野也会更开阔。

1 离心调速器

下面是理论力学习题中关于“离心调速器”的典型题目:

图 1 中, 设飞球调速器的主轴 O_1y_1 以匀角速度 ω 转动。设重锤 C 的质量为 M , 飞球 A, B 的质量各为 m , 各杆长度均为 l , 杆重可以忽略不计。试求调速器两臂的张角 α 。

利用动静法, 加上惯性力, 在动系中列写平衡方

程, 可以很快得到结果 (具体过程略)

$$\cos \alpha = \frac{m + M}{m\omega^2 l} g$$

如果只做到这里, 它只是一个普通的习题, 学生会计算, 也知道调速器两臂的张角 α 与转动的角速度有关, 但是可能很多学生不一定清楚, 它为什么叫“调速器”? 是怎样调速的? 它在历史上起到了什么作用?

实际上, 上述习题只反映了离心调速器的一部分内容, 如果把离心调速器画得更完整一点, 它的工作原理才更清楚。至少有两种调节速度的模式。模式一见图 2(a), 调速器转轴与动力轴直接用皮带轮相连接 (类似上面的习题), 当动力轴转动快时带动调速器小球升高, 使得调速器的转动惯量增加, 导致动力轴转速下降。模式二见图 2(b), 调速器小球位置的升降通过连杆与蒸汽机进气口阀门相连,

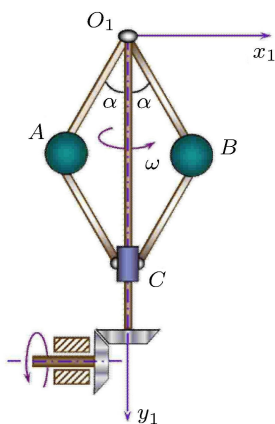
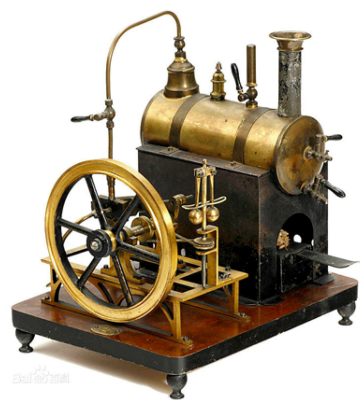


图 1 离心调速器



(a)

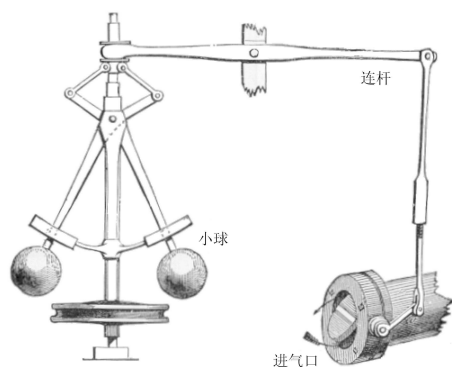
图 2 调速器不同的调速模式

2018-03-29 收到第 1 稿, 2018-04-02 收到修改稿。

1) E-mail: gaoyunfeng@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 高云峰. 理论力学习题背后的故事 (1)—— 蒸汽机的历史. 力学与实践, 2018, 40(3): 316-319

Gao Yunfeng. The history of steam engine—stories behind exercises of theoretical mechanics courses (1). *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(3): 316-319



(b)

图 2 调速器不同的调速模式 (续)

当动力轴转动快时带动调速器小球升高，连杆转动使进气口变小，导致动力轴转速下降。

模式一需要较大质量的小球才能让动力轴比较平稳地转动。因为机器本身就有个巨大的飞轮，其转动惯量很大，因此调速器小球在不同位置要有明显不同的转动惯量；模式二更灵活，通过连杆尺寸设计可以更方便控制转动轴的速度。感兴趣的读者可以自己建模比较一下两者的控制效果和效率。

2 行星齿轮

行星齿轮是理论力学运动学中的常见机构。典型的行星齿轮机构如图 3 所示，中间有一齿轮类似太阳；旁边的齿轮类似行星，既绕中间齿轮公转，又有自转，故得名。

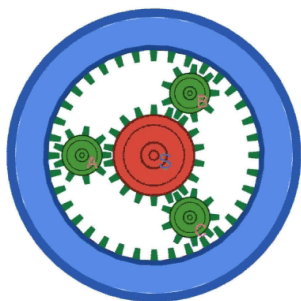
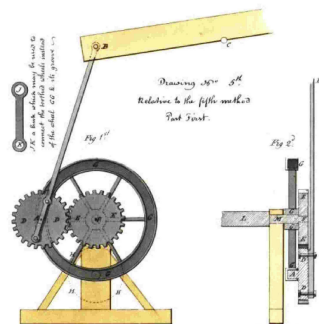


图 3 行星齿轮机构示意图

行星齿轮可以在直线运动与圆周运动之间进行转换。图 4(a) 是当年瓦特申请的蒸汽机专利图纸之一，利用行星齿轮，把气缸的直线往复运动转换为圆周运动。图 4(b) 是作者根据瓦特的图纸做的模型，该模型可以演示：(1) 右边气缸活塞上下运动时，可以带动左边行星齿轮的中心圆轮做圆周运动；(2) 左边行星齿轮转动时，可以带动活塞上下运动。

如果作为习题，可以求活塞运动速度与中心轮

角速度的关系；也可以寻找行星齿轮的齿数、连杆的尺寸等参数与活塞位移的关系。



(a)



(b)

图 4 蒸汽机中的行星齿轮

3 蒸汽机与离心调速器、行星齿轮的关系

蒸汽机是将蒸汽的能量转换为往复运动的动力机械，它是工业革命的标志。

如果在街头随意问行人“谁发明了蒸汽机”，十有八九会说是瓦特发明的，其实这是错误的，但是又有一定的道理。

1698 年英国发明家和工程师托马斯·塞维利 (Thomas Savery, 1650—1715) 发明了工业蒸汽机 (图 5)。他设计了两个部分：一是锅炉，二是密闭的工作容器。先通过锅炉把水加热，使蒸汽充满工作容器，然后关闭入汽孔，使工作容器中水蒸气冷凝，形成局部真空，当该容器与矿井下面的渗水相连时，通过外部大气压，就可以把水“吸”到高处，其原理是靠大气压力把水压上来的，所以水的提升高度和大气压力有关，在 9m 左右。这就是塞维利机，被命名为“矿山之友”，并申请了世界上第一个蒸汽机专利。

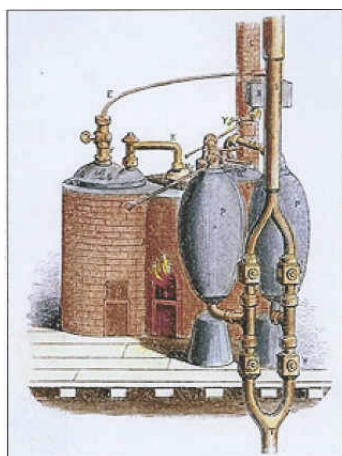


图5 塞维利的发明

法国物理学家德尼·帕潘 (Denis Papin, 1647—1713) 意识到塞维利机的不足, 于 1707 年将蒸汽引入汽缸中 (图 6 从右往左第 2 个容器), 靠活塞推动水升高。帕潘和塞维利的差别主要在于使用还是不使用活塞结构。

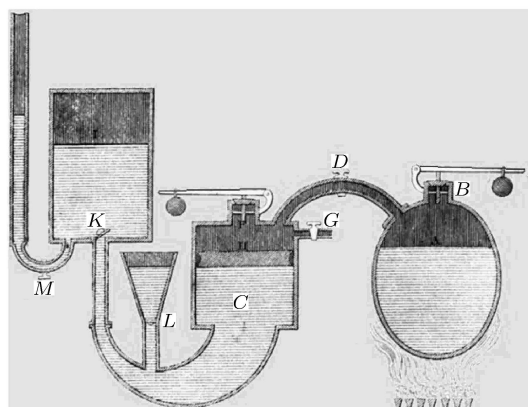
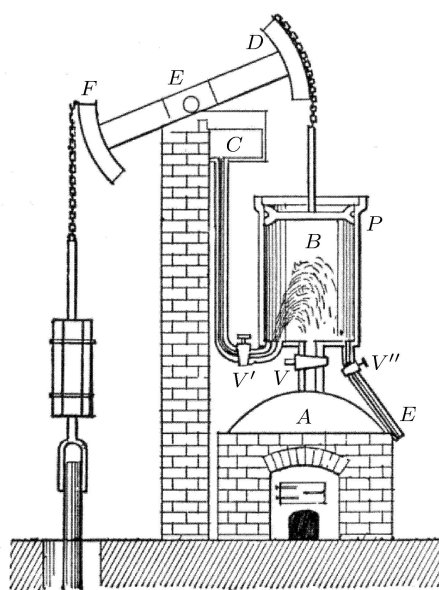


图6 帕潘改进的装置

托马斯·纽可门 (Thomas Newcomen, 1664—1729) 于 1712 年综合了帕潘的气缸活塞和塞维利靠冷凝蒸汽形成真空抽水的优点, 将抽水的工作机构和提供动力的蒸汽机完全分开, 这一分离标志着纽可门蒸汽机的完成。最初的蒸汽机被用来将矿井里的水抽出来。纽可门的蒸汽机 (图 7) 将蒸汽引入气缸后阀门被关闭, 然后冷水被撒入气缸, 蒸汽凝结时造成真空。活塞另一面的空气压力推动活塞。在矿井中联结一根深入竖井的杆来驱动一个泵。蒸汽机活塞的运动通过这根杆传到泵的活塞来将水抽到井外。



(a)



(b)

图7 托马斯·纽可门的蒸汽机

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

瓦特 (James Watt, 1736—1819) 在维修纽可门机时, 发现了蒸汽机效率不高的问题。从 1765 年到 1790 年, 他进行了一系列发明, 比如分离式冷凝器、汽缸外设置绝热层、用油润滑活塞、行星式齿轮、平行运动连杆机构、离心式调速器、节气阀、压力计等等, 使蒸汽机的效率提高到原来纽可门机的 3 倍多, 最终发明出工业用蒸汽机。

瓦特有很多发明 (或应用), 这其中就包括行星

式齿轮和离心式调速器,而且正是这两个小小的装置使得蒸汽机成为广泛应用的工业动力源,引发了工业革命。

在蒸汽机的改进过程中,瓦特开始研究如何将蒸汽机的直线往复运动转化为圆周运动,以便使得蒸汽机能为绝大多数机器提供动力,一个显而易见的解决办法是通过曲柄传动(图8)。1780年詹姆斯·皮卡德(James Pickard)发明了飞轮和曲柄一起使用,将往复式直线运动变成圆周运动。使用飞轮是为了克服“死点”,当曲柄与连杆平行时,滑块的运动不能带动曲柄转动;增加飞轮利用转动的惯性避开这一位置。他提出如果瓦特使用曲柄飞轮的发明,就要分享瓦特此前的分离冷凝器的专利,这一要求被瓦特坚决地拒绝了。

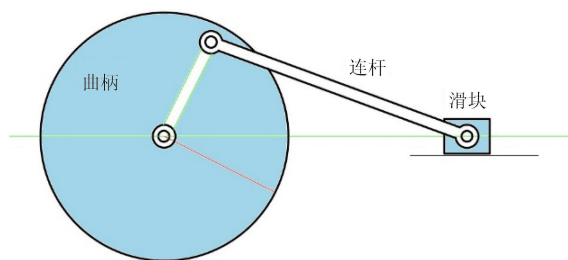


图8 曲柄滑块机构

1781年瓦特公司的雇员威廉·默多克(William Murdoch, 1754—1839)发明了行星齿轮传动系统,并以瓦特的名义成功申请了专利。这一发明绕开了曲柄专利的限制,极大地扩展了蒸汽机的应用。瓦特蒸汽机输出的不再是活塞的往复运动而是圆周运动,为其成为通用的动力机奠定了基础。

1784年,瓦特进一步对蒸汽机进行了改进,他利用(非发明)离心调速器保证了蒸汽机转速的平稳性。从此之后,纺织业、采矿业、冶金业、造纸业等工业部门,都先后采用蒸汽机做动力,工业革命由此真正产生。正是由于瓦特的工作使得蒸汽机大规模使用,人们容易误把他当作蒸汽机的发明人。

值得说明的是,行星齿轮使得蒸汽机从以往的直线往复运动变为圆周运动,可以成为各种机械装置的动力源;离心调速器使得蒸汽机的工作稳定,可以控制。正是由于调速器和行星齿轮的应用,才使得蒸汽机得到大范围的应用,也成为工业革命的标志。

工业革命改变了历史的发展进程,英国也由于工业革命的红利,成为了“日不落帝国”。回顾历史,有无数的发明创造,但是这几个装置对改变历史的进程竟然如此重要,恐怕出乎很多学生的意料吧。

(责任编辑:胡漫)

论经典力学中的参考系

吴昊¹⁾ 马凯 解敏

(西安理工大学土木建筑工程学院工程力学系,西安 710048)

摘要 力学最本质的问题是物体的受力与其运动的关系问题,本文对经典力学中的参考系进行了梳理和讨论,主要得到了以下结论:(1)探讨了牛顿第一运动定律在物理学和力学上的基础意义,利用该定律既可以对惯性参考系进行定义,同时也能够对时间进行度量;(2)指出了“绝对静止坐标系”未必存在,但近似的“绝对静止坐标系”却很容易找到;(3)分析了质心平动参考系的特殊性,总结了其对惯性参考系动力学理论在形式上的影响。

关键词 牛顿运动定律,惯性参考系,质心平动参考系

中图分类号: O316 **文献标识码:** A

doi: 10.6052/1000-0879-18-048

力学是研究物质在空间中位置变化的科学,其中最本质的问题是物体的受力与其运动的关系问题。在给定的空间中,一切运动的度量都是相对于

2018-01-25 收到第1稿,2018-03-16 收到修改稿。

1) 吴昊,讲师,主要研究方向为结构振动控制。E-mail: wuhaonwpu@163.com

引用格式: 吴昊,马凯,解敏.论经典力学中的参考系.力学与实践,2018,40(3):319-322

Wu Hao, Ma Kai, Xie Min. The reference systems in classical mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(3): 319-322