

机械工程概述

A Brief Introduction to Mechanical Engineering

未央-机械01 金佳熠

Jiayi Jin, Weiyang College

2021年1月

目录

1	机械工程的内涵	1
1.1	机械工程的定义	1
1.2	机械工程的子学科	1
1.2.1	力学	1
1.2.2	机电一体化和机器人技术	2
1.2.3	结构分析	3
1.2.4	热力学	3
1.2.5	机械制图	3
2	机械工程的主要发展历程	5
2.1	文明早期到上古时代	5
2.2	上古晚期到中世纪早期	5
2.3	中世纪时期	6
2.4	欧洲文艺复兴时期	6
2.5	工业革命	6
2.6	现代	7
3	机械工程领域的发展面临问题与挑战	9
3.1	零部件过分依赖进口	9
3.2	经营方式落后，忽视品牌策略	9
3.3	缺乏大量的相关性人才	10
4	案例：微型机器人的能源要求	11
4.1	微型机器人需要的动力	11
4.2	板载电源	11
4.3	无线电力传输	11
4.3.1	通过射频场（RF）无线传输电力	11
4.3.2	能量清除	12

1 机械工程的内涵

1.1 机械工程的定义

机械工程是工程学的一个分支，它将物理、数学的原理与机械系统的设计、分析、制造和维护相结合[4]。机械工程是工程学历史最悠久、口径最宽的一个分支。

机械工程领域需要了解一系列核心领域的知识，比如力、热、电、材料、结构分析等。除了这些核心知识外，机械工程师也会计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）和产品全生命周期管理来设计和分析生产车间、工业设备、医疗设备、飞机、船舶、机器人、军械等。机械工程是一个有关设计，生产和经营的工程学分支[8]。

1.2 机械工程的子学科

机械工程领域可以被看作是由许多机械工程学科集合而成的。本节列出并简要介绍一些在本科阶段通常会讲授的几个子学科。有些学科是机械工程所独有的，而另一些则是机械工程与一个或多个其他学科的结合。机械工程师所做的大多数工作都使用这些子学科中的几个以及专业子学科的技能和技术。

1.2.1 力学

工程力学通常被用于分析和预测物体在载荷或应力下的加速度和（弹性和塑性的）变形[5]。力学的子学科包括：

- **静力学**，研究力如何影响静体；
- **动力学**研究力如何影响运动的物体，包括运动学（关于运动，速度和加速度）和动力学（关于力和产生的加速度）；
- **材料力学**，研究不同材料在各种应力下如何变形；
- **流体力学**，研究流体对力的反应；
- **连续力学**，一种应用力学的方法，该方法假设对象是连续的（而不是离散的）。

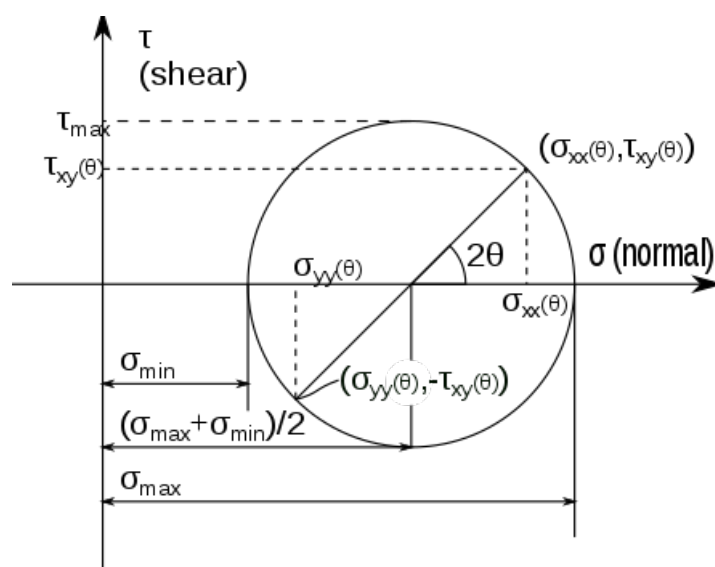


Fig. 1: Mohr's circle, a common tool to study stresses in a mechanical element

机械工程师通常在工程的设计或分析阶段使用力学知识。例如一个工程项目是车辆的设计，则可以使用静力学来设计车辆的框架，以便评估应力最强烈的位置。设计汽车发动机时，可能会使用动力学来评估发动机循环时活塞和凸轮中的力。材料力学可以用来为机架和发动机选择合适的材料。流体力学可以用于设计车辆的通风系统或设计发动机的进气系统。

1.2.2 机电一体化和机器人技术

机电一体化是机械，电气和软件工程的跨学科领域，专注于设计集成了电气和机械工程的混合系统。通过这种方式，可以通过使用专用软件，电动机，伺服机构和其他电气系统来使机器自动化[6]。机电一体化系统的常见示例是CD-ROM驱动器。机械系统打开和关闭驱动器，旋转CD并移动激光，而光学系统则读取CD上的数据并将其转换为位。集成软件控制该过程，并将CD的内容传输给计算机。

机器人技术是机电一体化技术的应用，用于创造机器人，通常在工业上用于执行危险，令人不快或重复的任务。这些机器人可以是任何形状和大小，但都经过预先编程，可以与世界进行物理交互[7]。为了设计机器人，工程师通常会运用运动学（以确定机器人的运动范围）和力学（以确定机器人内部的压力）

的知识。

机器人广泛应用于工业工程中。它们使企业可以节省劳动力成本，执行对人类而言太危险或精度要求太高或成本过高的任务，并确保更高的质量。许多公司都采用了机器人的装配线，尤其是在汽车工业中。除了工厂，机器人也被用于炸弹处理，太空探索等许多其他领域。

1.2.3 结构分析

结构分析是机械工程（以及土木工程）的一个分支，致力于检查物体为何以及如何失效以及修复物体及其性能。结构性故障以两种模式发生：静态故障和疲劳故障。当被分析的物体在加载（施加力）时破裂或发生塑性变形时（取决于失效标准），就会发生静态结构失效。疲劳失效在多次重复的加载和卸载循环后对象发生故障时出现。疲劳失效是由于物体上的缺陷而引起的：例如，物体表面上的微观裂纹在每个循环（传播）中都会略有增长，直到裂纹大到足以导致结构最终失效为止。

但是，故障并不能简单地被定义为零件断裂，而应定义为零件未按预期运行的时候，因为某些系统被设计成断裂的。如果这些系统没有损坏，则可以使用故障分析来确定原因。

机械工程师通常在发生故障后或设计避免故障时使用结构分析。工程师经常使用在线文档和书籍帮助他们确定故障的类型和可能的原因。

1.2.4 热力学

简单来说，热力学是对能量及其使用和系统转化的研究[15]。通常，工程热力学研究的是将能量从一种形式转化为另一种。例如，汽车发动机将燃料中的化学能（焓）转化为热量，然后转化为机械功，最终使车轮转动。

机械工程师在热传递，热流体和能量转换的方面会使用热力学原理。他们利用热力学来设计发动机和发电厂，供暖，通风和空调（HVAC）系统，热交换器，散热器，散热器，制冷，隔热等。

1.2.5 机械制图

在机械工程领域中，机械图是表达设计对象最重要的载体之一，是交流设计思想的有效手段，在产品设计与表达中具有语音、文字、实物模型等其他载

体不可替代的作用，是“工程师的语言” [22]。使用CAD软件创建的三维模型通常也用于有限元分析（FEA）和计算流体动力学（CFD）。

2 机械工程的主要发展历程

2.1 文明早期到上古时代

早在文明初期，工程就随着灌溉，建筑和军事工事等大型结构的建造而兴起。通过灌溉获得的粮食生产的进步使一部分人成为了古巴比伦时期的专家[3]。

古代近东地区¹出现了六种经典的简单机械结构。人们在史前时期就知道了楔和斜面。大约公元前5000年，美索不达米亚地区发明了轮和轮轴结构。杠杆装置大约5000年前最早出现于近东地区，当时被用在简单的天平上以及在古埃及搬运庞大的物体。杠杆也被用于使用桔槔打水。第一台起重机出现在公元前3000年左右的美索不达米亚地区[10]。滑轮最早可以追溯到公元前2000年的美索不达米亚和古埃及的第十二王朝（公元前1991–1802）。螺钉是最后一个被发明的简单机械，最早出现在美索不达米亚的新亚述时期。埃及金字塔的建造过程中使用了其中的三种结构，分别是斜面、楔和杠杆[24]。

机械工程在不同的古代文明中都被大量运用。德国考古学家罗伯特·科德维发现，巴比伦空中花园很可能使用由一种滑轮驱动的机械泵将水输送到屋顶花园[18]。在古埃及，螺杆泵是另一个利用工程技术提高输送水效率的例子[3]。最早的以水为动力的实用机器是水车，第一次出现在早期公元前4世纪的波斯帝国[20]。

2.2 上古晚期到中世纪早期

在古罗马埃及，亚历山大英雄（约公元10-70年）发明了世界上第一台蒸汽动力装置，但它除了自身旋转外，不能移动或驱动任何东西[2]。在中国，张衡（公元78-139年）改进了水钟并发明了地震仪，马骏（公元200-265年）发明了带有差速器的战车。除少数机器外，由于古代晚期罗马帝国的崩溃，西方的工程和科学停滞不前。

¹近东，早期近代西方地理学者以“近东”指邻近欧洲的“东方”，具体指地中海东部沿岸地区，包括非洲东北部和亚洲西南部，有时还包括巴尔干半岛。第二次世界大战后，此称渐为“中东”取代，但两者常通用。

2.3 中世纪时期

在伊斯兰黄金时代（7至15世纪），穆斯林发明家在机械技术领域做出了杰出的贡献。贾扎里（Al-Jazari）就是其中之一，他于1206年撰写了著名的《巧妙的机械设备知识》，并介绍了许多机械设计。贾扎里也是第一个创建诸如曲轴和凸轮轴之类的装置的人，现在这些装置已成为许多机构的基础[1]。这一时期，伊斯兰世界也出现了最早的实用的风力装置，包括风车和风泵。最早的实用蒸汽动力机器是由蒸汽轮机驱动的蒸汽千斤顶，于1551年由Taqi al-Din Muhammad ibn Ma'ruf在奥斯曼帝国的埃及所发明。

印度于公元6世纪发明了轧棉机，11世纪初伊斯兰世界发明了纺轮，这两者都棉业发展都是很重要的[14]。纺车还是珍妮纺纱机的原形。

最早的可编程机器也出现在伊斯兰世界。音序器（music sequencer）就是一个可以编程音乐的机器。第一个音序器是由Banu Musa兄弟发明的自动长笛演奏器。1206年，贾扎里发明了可编程机器人。他描述了四个机器人音乐家，包括由可编程鼓机操作的鼓手，可以使它们演奏不同的节奏和不同的鼓声[23]。

当时的中国钟表匠和工程师苏松（1020–1101）在欧洲中世纪在钟表中发现擒纵装置之前的两个世纪，将擒纵机构整合到了他的天文钟塔中[12]。

在中世纪，机器被广泛用来辅助劳动。英格兰和北欧的许多河流都可以利用自来水的力量。风能后来成为欧洲的新能源，补充了水力。

2.4 欧洲文艺复兴时期

在17世纪，英国的机械工程基础发生了重要的突破。艾萨克·牛顿提出了牛顿运动定律，并发明了微积分。莱布尼兹也在同一时期提出了微积分。达·芬奇设计并研究了许多和运输与武器有关的机械系统。

尽管风力为远离河滨的庄园提供了能源，并在治理方面取得了长足的进步，但它无法替代水磨坊一贯的强大动力。在文艺复兴时期，水仍然是工业化前城市工业的主要动力来源[19]。

2.5 工业革命

在文艺复兴末期，科学家和工程师开始尝试蒸汽动力。大多数早期设备都面临着马力低，效率低下或危险的问题。托马斯·纽科门根据之前其他工程师

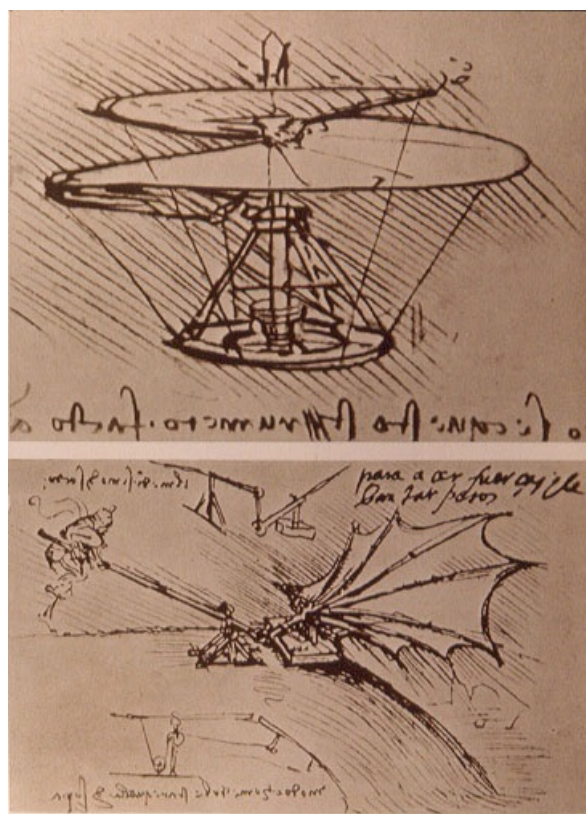


Fig. 2: Da Vinci's flying machine concepts

所取得的进步，开发出纽科门大气发动机。这种新设计大大减少了热量损失，直接从发动机中排出水，并可以加入各种比例的燃料。

在19世纪，随着材料科学的进步，蒸汽机已经应用于蒸汽机车和蒸汽动力船中，从而迅速提高了人员和货物在世界范围内移动的速度。取得这些进步的原因是英格兰，德国和苏格兰开发出了机床。这使得机械工程学可以发展成为工程学中的一个独立领域，带来了制造机器和驱动引擎[21]。

在工业革命接近尾声时，内燃机技术带来了活塞式飞机和汽车。煤在实际应用中也开始逐渐被油基衍生物所取代。

2.6 现代

随着20世纪计算机的出现，工程师可以使用更精确的设计和制造方法。CAD软件的兴起减少了设计时间，并允许进行精密制造。工程师能够通过计算

机程序模拟设计的力。自动化和计算机化制造使机械工程出现了许多新领域，例如工业工程。

由于工程项目的复杂性不断提高，许多工程师的专业领域不断细化，所以他们通常要进行跨领域的合作。比如在机器人领域，电气工程师，计算机工程师和机械工程师就需要进行跨领域的合作。

专业协会的成立

英国在土木工程师学会成立30年后，于1847年成立了第一个机械工程的专业协会——英国机械工程师学会（Institution of Mechanical Engineers）。美国则于1880年成立了美国机械工程师协会（ASME），是继土木工程师协会（1852）和矿业工程师协会（1871）后全美第三个工程协会。中国则于1936年成立了中国机械工程学会，是我国成立较早、规模最大的工科学会之一。

3 机械工程领域的发展面临问题与挑战

近年来，随着社会经济的快速发展和科学技术的日益进步，我国在机械工程领域取得了巨大的成就，领域内的企业数量不断增加，全球竞争力不断增强。但与此同时，机械工程领域也面临着诸多挑战。

3.1 零部件过分依赖进口

近年来，尽管我国机械工程技术取得了巨大进步，但与发达国家仍有较大差距。中国更多是一个“组装大国”，对于一些精密零部件没有足够的能力进行生产，只能依赖进口。比如我国每年虽然生产大量的圆珠笔，但圆珠笔的关键技术——笔尖却长期依赖外国。生产一支圆珠笔的笔头，需要经过20多道工序，除了圆珠笔笔尖的钢珠需要严格控制摩擦系数，笔尖内部还有五条引导墨水的沟槽，需要十分精密的技术，要达到千分之一毫米的水平，以我国的机械加工水平，要达到这一要求还有很大差距。

一方面，重要零部件过度依赖进口会大幅增加我国机械行业的制造成本。据统计，我国零部件进口成本占制造成本的40%左右，很大程度地挤压了企业的利润空间，形成的利润也大多流向国外。再加上相关的行业人才不足，不得不高价从其他国家招聘专家，进一步提升了成本，压缩了利润。

另一方面，由于核心技术受制于人，我国企业在供应链中长期处于被动，不利于我国机械产业安全发展。长期以来，其他国家对我国的高端数控机床实施严厉打压和严格管控。近年来，美国多次以各种理由限制芯片等核心技术零部件向我国输出，对我国相关行业的生产带来了不小的负面影响。

这一状况与我国机械工程行业研发投入较少有很大关系。研发投入占销售收入的比例远低于国外，导致创新性太低。

3.2 经营方式落后，忽视品牌策略

放眼世界，大多优秀的国际机械制造企业都有很强烈的品牌意识。尽管我国机械工程行业经过多年的发展，出现了中联重工、龙工等优秀企业，但与国外的企业相比，在后续服务上仍有很大提升空间。国内机械行业只重视消费者的短期购买，却忽视形成长期的消费网链。国外的机械厂商会不断地为购买其

产品的客户提供维护和升级，而在我国，由于机械产品质量较低，故障率较高，再加上售后缺乏积极性，导致机械行业难以形成优势，羁绊了机械工程行业的发展。

3.3 缺乏大量的相关性人才

当前我国机械行业拥有宽广的发展前景，但人才短缺的状况却是一块短板。组装和设计研发的人才都是求过于供，尤其是核心人才。一方面，学生和家长对于机械工程专业存偏见，认为该专业学生毕业后就业压力大、工作环境恶劣、收入较低，所以机械专业难以吸引优秀人才[17]。另一方面，世界各国纷纷推出吸引外籍人才策略，以及国际跨国机械工程企业以各种优惠条件争夺我国人才，机械领域面临严峻的人才流失。

对于机械人才本身，也存在缺乏综合知识体系的问题。机械设计制造专业人才普遍存在知识结构单一的问题，且常缺乏专业技术和实践经验[25]。也就是说，我国机械工程领域缺乏复合型人才，这与该领域的发展趋势并不一致。

以上两类问题导致中国机械行业的技术研究虽然一直在推进，但是若要追赶世界机械行业的领先水平还是有不小难度。

4 案例：微型机器人的能源要求

除了生物混合动力和化学动力之外，所有当前的微型机器人都由外部供电。化学电池等板载电源由于体积的限制，却又很难在微观下被利用。无论是板载电源还是远程供电为微型机器人提供动力，都面临着巨大挑战。相比之下，板载电源用于传感器目前更加可行[9]。

4.1 微型机器人需要的动力

移动微型机器人所需要的机械力取决于它的体积大小和操作环境。对于一个恒定力，其功率满足

$$P = Fv. \quad (1)$$

根据几款微型机器人的估计，微型机器人所需的功率都是纳瓦特级的[11][13][16]。尽管这和宏观下的机器人系统所需的动力相比小得多，但对于板载电源来说还是太高。

4.2 板载电源

伏打电池通过导电电解质在阳极和阴极材料之间传递离子。尽管电池存储容量随体积的增加而增大，但已经制得了微型薄膜电池，但这种存储技术无法很好地小型化。在研究阶段可用的最小的电化学电池存储是数百纳米厚的薄膜结构，能量密度约为 $50\mu\text{Ahcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ，电流密度约为 $10\mu\text{Acm}^{-2}$ ，产生的电压约为1.5V。这些电池的尺寸仅为几毫米。但是，这种电池整合后所能驱动微型机器人执行的动作十分有限[9]。

4.3 无线电力传输

比起板载电源，无线电力输送能够更好地克服电力存储的限制。

4.3.1 通过射频场（RF）无线传输电力

使用小型拾波线圈，可以将感应式功率接收器制成小于1毫米的尺寸。系统

由谐振频率与拾波线圈匹配的发射线圈驱动。利用射频传输电力，其功率为

$$P_r = \frac{P_0 \lambda_\omega^2}{4\pi R_{tr}^2} \quad (2)$$

其中 λ_ω 为信号的波长， R_{tr} 为收发装置之间的距离。可以得出最理想的条件是功率正比于 $\frac{1}{R_{tr}^2}$ ，但事实上可能会衰减更快，所以在设计的时候收发装置之间的距离是很重要的因素[9]。

这种感应式的电力传输可以通过大型的拾波线圈在几米范围内传输上万瓦的电力。研究表明，这种方式的传输效率大约高达40%。然而，这些技术才刚刚在短距离内开始投入实际应用。事实上，由于输送功率正比于接收线圈的面积，这种技术很难缩小到毫米级。

4.3.2 能量清除

能量清除利用自然环境中的机械振动来发电，尤其是振动强烈的区域，比如和人常常交互的机构。大多数这种振动源的频率在60–200Hz，振幅约0.1 – 10m/s²。设备可以通过压电，磁致伸缩，静电或磁性元件来收集此功率。谐振系统从振幅为 A_0 的振荡中获得的电功率为

$$P_e = \frac{m\zeta_e A_0^2}{4\omega_0(\zeta_e + \zeta_m)^2} \quad (3)$$

其中 ζ_e 为电阻尼比， ζ_m 为振荡器的机械阻尼比， ω_0 为振荡频率。可以看出，功率正比于振荡质量和振荡振幅的平方，反比于频率[9]。

能量清除也可以从热梯度、流体和无线电波中获得能量。然而，这一技术受限于较低的转化率和困难的小型化。

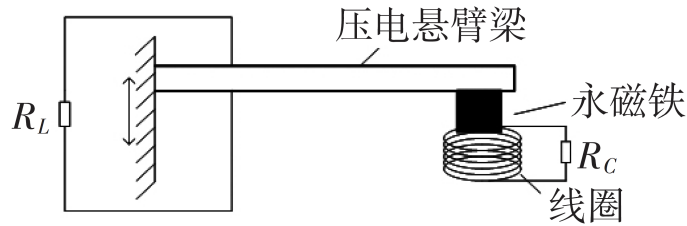


Fig. 3: Diagram of piezoelectric and electromagnetic power generation device

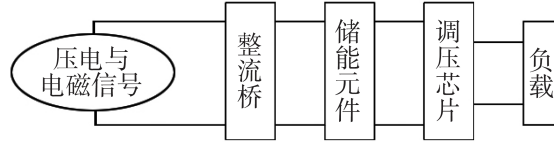


Fig. 4: Block diagram of energy collection and storage circuit

在一篇论文[26]中，提出了在类似原理装置基础上加强能量收集能力的一些具体方法，简化模型如图3,4 所示，在压电悬臂梁下增加相应配重，通过满足电磁感应、受迫振动、压电效应几大物理过程的相位关系，让由超声或电磁力引起的振动复合，达到增加振幅的目的。结果表明：给出的数学模型基本反映了系统的输出特性（图5）。

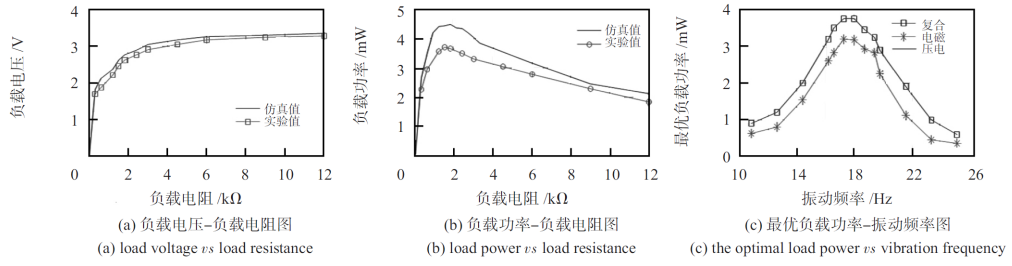


Fig. 5: Simulation compared with experimental results

参考文献

- [1] Al-Jazaris and D. R. Hill, *Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices*. Dordrecht Reidel, 1974.
- [2] E. Britannica, *Heron of Alexandria*. 2019. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/biography/Heron-of-Alexandria>.
- [3] L. S. D. Camp, *The Ancient Engineers*. Doubleday, 1963.
- [4] W. Contributors, *Mechanical engineering*, Wikipedia, Jan. 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_Engineering.
- [5] —, *Mechanics*, Wikipedia, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanics>.
- [6] —, *Mechatronics*, Wikipedia, Jul. 2019. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mechatronics>.
- [7] —, *Robotics*, Wikipedia, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Robotics>.
- [8] W. Dictionary, *Definition of mechanical engineering*, merriam-webster.com, 2019. [Online]. Available: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/mechanical%20engineering>.
- [9] E. Diller, *Micro-scale Mobile Robotics*. Now Publishers Inc, 2013.
- [10] G. Faiella, *The technology of Mesopotamia*. Rosen Pub. Group, 2006.
- [11] D. R. Frutiger, K. Vollmers, B. E. Kratochvil, and B. J. Nelson, “Small, fast, and under control: wireless resonant magnetic micro-agents,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, pp. 613–636, Nov. 2009. DOI: 10.1177/0278364909353351. (visited on 01/07/2021).
- [12] N. Joseph, *Science and Civilization in China*. Caves Books, Ltd., 1986, vol. 4.

- [13] M. P. Kummer, J. J. Abbott, B. E. Kratochvil, R. Borer, A. Sengul, and B. J. Nelson, “Octomag: an electromagnetic system for 5-dof wireless micro-manipulation,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, pp. 1006–1017, Dec. 2010. DOI: 10.1109/tro.2010.2073030. (visited on 01/07/2021).
- [14] A. Lakwete, *Inventing the cotton gin : machine and myth in antebellum America*. Johns Hopkins University Press, 2005, pp. 1–6.
- [15] NASA, *Thermodynamics*, nasa.gov, 2015. [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/thermo.html>.
- [16] C. Pawashe, S. Floyd, and M. Sitti, “Modeling and experimental characterization of an untethered magnetic micro-robot,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, pp. 1077–1094, Jul. 2009. DOI: 10.1177/0278364909341413. (visited on 01/07/2021).
- [17] S. Qian, “Opportunities and challenges in the construction of engineering machinery,” *Heilongjiang Science*, vol. 9, pp. 110–111, Aug. 2018.
- [18] K. Robert, *The Excavations at Babylon*. Macmillan and Co., 1914, p. 91.
- [19] J. Sawday, *Engines of the Imagination : Renaissance Culture and the Rise of the Machine*. Routledge, 2007.
- [20] H. Selin, *Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*. Springer Science & Business Media, 1997, p. 282.
- [21] R. H. Thurston and W. N. Barnard, *A History of the Growth of the Steam-Engine*. Cornell University Press, 1939, pp. 35–36.
- [22] L. Tian and J. Feng, *Engineering Graphics and Mechanical Drawing*. Tsinghua University Press, 2013.
- [23] H. R. Turner, *Science in Medieval Islam : an Illustrated Introduction*. University Of Texas Press, 1997.
- [24] M. Woods and M. Woods, *Ancient machines*. Twenty-First Century Books, 2000.

- [25] Z. Xiangyang, “Analysis on training of professionals in mechanical design and manufacturing and automation,” *Innovation in Mechanical and Electronic Education*, vol. 50, p. 80, Feb. 2019.
- [26] S. Yu and S. Juan-wei, “Sensor self-powered technology research based on vibration energy harvesting,” *Transducer and Microsystem Technologies*, vol. 34, 2015. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2015)09-0013-04.