

伽马型斯特林发动机的性能评价

Kwasi-Effah C. C.¹, Obanor A. I.¹, Aisien F. A.¹, Ogbeide O. O.²

1 尼日利亚 贝宁市 贝宁大学机械工程系

2 尼日利亚 贝宁市 贝宁大学生产工程系

摘要: 由于 20 世纪开始的人口增长和快速工业化, 对能源的需求正在扩大。随着家庭和工业系统利用能源系统产生的无障碍能源, 技术进步对于这些系统最大限度地利用世界上可用的无障碍能量至关重要。因此, 对斯特林发动机技术的兴趣再次增长。本文利用三阶准定常流模型, 在 MATLAB 环境下进行了模拟, 预测了实验伽马型斯特林发动机在加热器温度为 1145K 时的性能。将模拟性能与实验值进行比较后, 预测误差为 8.24%。经验方法如 Beale 和 West 分析也被用于预测斯特林发动机的性能。与 Beal 和 West 分析等其他方法相比, 准稳定流模型显示出更好的精度。**关键词:** 实验发动机; 伽马型; 建模; 模拟斯特林发动机

Performance Appraisal of a Gamma-Type Stirling Engine

Kwasi-Effah C. C.¹, Obanor A. I.¹, Aisien F. A.¹, Ogbeide O. O.²

1. Department of Mechanical Engineering, University of Benin, Benin City, Nigeria

2. Department of Production Engineering, University of Benin, Benin City, Nigeria

Abstract: The demand for energy is expanding due to increase in population and fast industrialization which started in the 20th century. As domestic and industrial systems make use of the accessible energy produced by energy systems, technological headway is critical for these systems to maximally use the accessible energy sources available in the world. Thus, interest in Stirling engine technology is growing once again. This paper utilizes a third order quasi-steady flow model to predict the performance of an experimental gamma type Stirling engine at the heater temperature of 1145K by simulating in MATLAB environment. A prediction error of 8.24% was obtained after comparing simulated performance with the experimental values. Empirical methods such as Beale and West analysis were also used to predict the performance of the Stirling engine. The quasi-steady flow model showed better accuracy when compared to other methods such as Beal and West analysis.

Keywords: Experimental engine; Gamma type; Modeling; Simulation; Stirling engine

1. 引言

斯特林发动机通过发动机两端的温差使气体循环压缩和膨胀来产生机械功。热量以恒定的温度持续地添加到膨胀气体中。这种恒温热膨胀推断出通过气缸的高传热率, 这是斯特林发动机的主要挑战之一^[1]。相比之下, 传统的往复式内燃 (IC) 发动机在气缸内燃烧空气-燃料混合物以产生热量和压力, 这些热量和压力转化为曲轴的功。在内燃机的动力冲程中, 温度大部分不是恒定的, 而是随着燃烧和活塞运动的继续而变化^[2]。由于热量从外部供应给斯特林发动机, 因此可以利用不同类型的热源, 例如: (a) 任何气体、流体或固体燃料的燃烧热, 包括所有常规化石燃料和低成本固体燃料, 例如汽油内燃机, 具有相当有限的燃料特性, 以保证使用其他燃料进行燃烧。(b) 太阳能辐射, 例如通过太阳能皿使用集中太阳能 (c) 放射性同位素产生的热量 (d) 金属铸造、玻璃生产等工业过程产生的废热 (e) 热回收装置产生

的废热, 例如内燃机排气产生的热量。为了完成热力循环, 斯特林发动机必须进行外部冷却, 以释放活塞上的压力, 并沿着这些线使其返回初始位置。冷却可以通过不同的方式实现, 例如: (a) 强制或自由对流冷却, 例如, 散热片上的气流; (b) 水、乙二醇或两者的混合物, 环绕发动机冷侧的冷却套。在这里, 冷却液通常由风冷热交换器保持冷却, 如车辆散热器。

此外, 斯特林发动机循环是“可逆的”, 这意味着可以利用机械动力输入来提供冷却。该商标还将斯特林发动机循环与在内燃机中产生动力的循环分开。外部燃烧允许对燃料进行更可控的燃烧, 从而降低排放。与内燃机相比, 恒定的外部燃烧同样具有噪音和振动小得多的额外优势^[3, 4]。本文旨在研究伽马型斯特林发动机的性能

2. 方法

采用微分控制体积法建立了三阶准稳态流动模型。

伽马型斯特林发动机配置为五个控制体积，串联连接，具有无可挑剔的热交换器，包括再生器。膨胀和压缩空间都被认为是绝热的。所作假设总结如下：(i) 每个控制体积中的工作气体被视为理想气体。(ii) 压缩和膨胀空间被认为是绝热的。(iii) 整个系统的压力最初是恒定的。(iv) 假定系统中气体的总质量恒定，因此无泄漏(v) 通过界面输送的焓假定上游温度和质量流率的值(vi) 热交换器最初是完美的。使用 MATLAB 对模型进行了模拟，输入数据来自实验性伽马型斯特林发动机。

实验旨在测量实验发动机的功率输出。发动机启动前，将气罐放在称重天平上，并记录初始气体质量。然后点燃气体燃烧器，并在整个测试过程中保持气体流速恒定。发动机被加热到工作温度。然后启动并运行发动机，直到达到稳定状态。通过在重量吊架上增加自重直到飞轮停止来加载发动机。之后，记录发动机转速值、弹簧平衡读数和热电偶的所有温度。

3. 结果和讨论

表 1 和表 2 显示了实验发动机的模拟数值结果，图 1 和图 2 显示了试验发动机的模拟性能结果。

Parameters	Values
Total mass of gas	0.66gm
Expansion Work (W_e)	0.8865Joules
Compression Work (W_c)	-0.2385Joules
Indicated power	4.86Watts
Indicated efficiency	73.1%

表 1. 实验伽玛型斯特林发动机的模拟结果。

Frequency (Hz)	Heater temperature (K)	Cooler temperature (K)	Torque (Nm)	Brake power (W)	Brake thermal efficiency (%)
6.72	1145	308.46	0.083	3.50	42.60

表 2. 实验发动机在 1145K 下的结果。

Simulated indicated power	4.86W
Actual indicated power	4.49W
Prediction error	8.24%

表 3. 实验发动机性能总结。

Beale	West	Quasi-steady flow model
2.29W	2.61W	3.50W

表 4. Beale、West 和准稳态流模型比较。

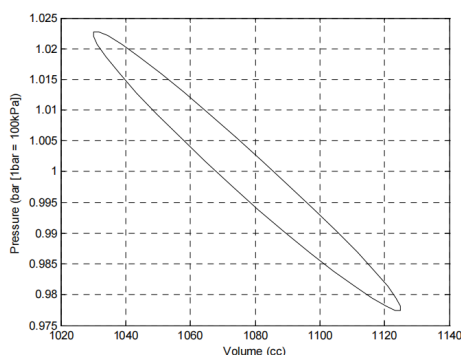


图 1. 模拟发动机的压力 - 体积图。

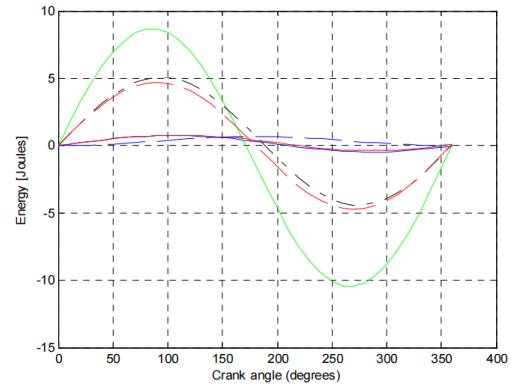


图 2. 能量与曲柄角。

表 1 显示了具有 4.86W 指示功率输出和 73.1% 效率的模拟性能值。表 3 显示了流体特性特性。图 1 显示了模拟实验发动机的 pV 图。图 2 显示了冷却器、加热器和再生器中的能量变化。在实验研究期间，观察到，由于冶金限制，通过提高加热器温度，该实验发动机可达到的最大加热器温度被限制在 1145K，以避免损坏。这是与斯特林发动机设计相关的重大实际挑战。因此，通过增加温度梯度和工作压力，发动机性能可以不断提高。通过比较发动机的实验结果和模拟结果，获得了 0.37W 的功率输出差，具有约 8.24% 的绝对预测误差。预测误差可能是由于仪器误差、人为误差、机械摩擦和轻微泄漏。因此，通过利用该模型，可以观察用于优化目的的各种参数的影响，并制造具有不同容量的伽马型斯特林发动机。能量与曲柄角的关系图是蓄热器在整个循环中传热的一个令人印象深刻的度量。这表明，发动机性能基本上取决于再生器的效率及其适应高热通量的能力。从本质上讲，在循环的前半部分中，气体向再生器基质排出的能量等于在循环的后半部分中来自再生器矩阵的气体消耗的能量，沿着这些线，在循环中向再生者的净热传递为零。在罗伯特·斯特林 (Robert Stirling) 独特的专利描述了蓄热器的功能和意义之后，大约 100 年来，人们都没有理解蓄热器的重要性。对于能量曲柄角图，我们特别看到，膨胀空间做功经历了不同于加热器传热的过程，但在循环结束时，它们具有相同的质量。压缩空间做功和传递到冷却器的热量也是如此。因此，对于该模型，我们可以说，在整个循环中膨胀和压缩空间中所做的功由单独的冷却器和加热器热交换器给出。^[5] 提出了一个模型，该模型考虑了施密特理论中驱动机构的有效性，以分析伽马型配置的发动机性能。在 10kW 伽马型斯特林发动机上的实验结果表明，发动机的机械效率对发动机的轴功率有很大影响。Martini 基于 Schmidt 理论提出了一个等温模型，并考虑了热损失和压力损失^[6]。通过考虑加热器和冷却器中的温度降来获得热气体和冷气体的温度。他的模型使用 GPU-3 斯特林发动机获得的实验数据进行了验证。与实验结果相比，有 20% 的误差^[7]。Roy 和 Tew 将他们的模型与 GPU-3 斯特林发

动机的实验数据进行了比较。当氢气和氮气的再生器摩擦系数分别增加 4.0 和 2.6 倍时, 模型将制动功率和效率的预测值都提高了 5%–30%^[8, 9, 10]。

4. 结论

在 1145K 的设计温度值下, 对伽马型实验发动机性能进行了研究。通过对比发动机的实验结果和模拟结果, 获得了 0.37W 的功率输出差, 其绝对预测误差约为 8.24%。能量图表明, 系统的效率主要取决于再生器的效率。与 Beale 和 West 分析等其他方法相比, 准稳态模型显示出更高的精度。准稳态流动模型也有利于参数化和优化研究, 以更好地设计伽马型斯特林发动机。

参考文献

- [1] Blank, F. A., (2011). Power optimized work for reciprocating internally reversible Stirling-like heat engine cycles with regeneration and linear external heat transfer. *Journal of Applied Physics*, 84 (5): 238–292.
- [2] Chen, N. C. and Griffin, F. P., (1983). A review of Stirling engine mathematical models. Technical Report. Report No ORNL/CON 135, OAK Ridge National Laboratory, Tennessee.
- [3] Dixit, D. K, Ghodke, SV (2012). Renewable energy powered Stirling engines—a viable energy alternative. In: Sayigh AAM, editor. Renewable energy technology and the environment. Proceedings of the second world renewable energy congress, 2: 934 – 8.
- [4] Formosa, F. and Despesse, G., (2010). Analytical model for Stirling cycle machine design. *Energy Conversion and Management*, 51: 1855–1863.
- [5] Gheith, R., Aloui F. and Ben S. N., (2012). Study of the regenerator constituting material influence on a gamma type Stirling engine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (4): 1251 – 1255.
- [6] Toda, F. S., Iwamoto, K. and Nagajima, N., (2007). Development of low-temperature difference Stirling engine behavior of the mechanism effectiveness for the performance prediction method. Proceeding of 13th international Stirling engine conference, Tokyo.
- [7] Kolin, I., (2001). Ideal Stirling cycle in Alpha, Beta and Gamma engine. Proceedings of the 10th Stirling engine conference 24th – 26th September, Osnabruck, Germany.
- [8] Roy, C. and Tew, J. R., (1983): Computer program for Stirling engine performance calculations. DOE/NASA/51040–42 NASA TM–82960.
- [9] Hsu, S. T. Lin F. Y. and Chiou, J. S., (2013). Heat-transfer aspects of Stirling power generation using incinerator waste energy. *Journal of Renewable Energy*, 28: 59–69.
- [10] Kim, S. Y., (2006): Specific power estimations for free-piston Stirling engines. 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, San Diego: 80–19.