

MÔ PHỎNG CƠ CHẾ NHÂN ĐIỆN ÁP CỦA MÁY GIA TỐC WALTON-COCKCROFT PHỤC VỤ GIẢNG DẠY

Nguyễn Ngọc Anh^{1*}, Đoàn Minh Lượng²

¹Viện nghiên cứu tiên tiến Phenikaa (PIAS), Trường Đại học Phenikaa, Hà Nội, 12116,
Việt Nam

²Sinh viên nghiên cứu tại Viện nghiên cứu tiên tiến Phenikaa (PIAS),
Trường Đại học Phenikaa

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 9/01/2025

Ngày phản biện: 12/01/2025

Ngày duyệt đăng: 04/3/2025

*Tác giả chính:

anh.nguyennhoc1@phenikaa-uni.edu.vn

DOI:

<https://doi.org/10.70879/Pxje5yKQX>

Title:

Simulation of the Walton-Cockcroft

Voltage Multiplier for Teaching

Purposes

Từ khóa:

Walton-Cockcroft, bộ nhân điện áp, máy gia tốc, python

Keywords:

Walton-Cockcroft, voltage multiplier, accelerator, Python

TÓM TẮT: Trình bày các vấn đề một cách trực quan có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong giảng dạy, đặc biệt là đối với các môn học chuyên ngành có độ phức tạp cao. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã sử dụng Python để xây dựng một gói lệnh để mô phỏng cơ chế nhân điện áp của máy gia tốc Walton-Cockcroft. Gói lệnh này cung cấp cho người dạy và người học hình ảnh trực quan về quá trình tạo ra chênh lệch điện thế cao của máy gia tốc Walton-Cockcroft, qua đó cải thiện khả năng truyền đạt của giảng viên, hỗ trợ đầy nhanh quá trình tiếp thu kiến thức của sinh viên..

ABSTRACT: Presenting concepts visually is particularly important in teaching, especially for highly complex specialized subjects. In this study, we utilized Python to develop a package that simulates the voltage multiplier of the Walton-Cockcroft accelerator. This package provides educators and learners with a visual representation of the high voltage generation process of the Walton-Cockcroft accelerator, thus improving the teaching process of lecturers and boosting the understanding of students.

1. Giới thiệu vấn đề nghiên cứu

Ngày nay, máy gia tốc xuất hiện ở khắp mọi nơi trong cuộc sống của chúng ta, từ các máy gia tốc khổng lồ, như máy va chạm lớn (Large Hardon Collider - LHC) [1] ở Thụy sĩ, được sử dụng để nghiên cứu vật lý hạt cơ bản, đến các máy gia tốc tuyến tính có thể đặt gọn trong một không gian có kích thước nhỏ dùng trong xạ trị hạt nhân [2]. Mục tiêu chung của các thiết bị này là để gia tốc các hạt mang điện tới năng lượng mà ta mong muốn. Trong suốt chiều dài lịch sử phát triển của máy gia tốc, vị trí tiên phong thuộc về máy gia tốc

Walton-Cockcroft [3], được đặt theo tên của hai nhà vật lý học người Anh và Ai-len là John Douglas Cockcroft và Ernest Thomas Sinton Walton. Ở vào thời điểm những năm 1932, các nhà vật lý cố gắng gia tốc hạt mang điện bằng cách đặt nó vào trong một điện trường mạnh tạo bởi một sự chênh lệch điện thế lớn, khi đó năng lượng mà hạt thu được $E = q \cdot U$, với q là điện tích của hạt và U là hiệu điện thế. Tuy nhiên, điện thế một chiều cao nhất có thể đạt được ở thời điểm đó chỉ vào khoảng 200 kV, thấp hơn rất nhiều so với

giá trị mong muốn của các nhà khoa học, lên tới hàng triệu Vôn.

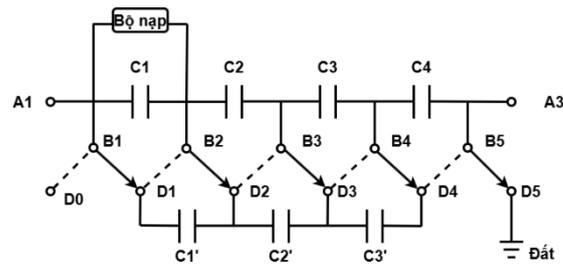
Walton và Cockcroft đã đưa ra một giải pháp sử dụng một chuỗi các tụ điện có hiệu điện thế nhỏ, và ghép nối chúng lại để tạo ra một điện thế lớn. Phương pháp Walton – Cockcroft bắt đầu với một chuỗi các tụ điện chưa được tích điện, và tiến hành tăng dần hiệu điện thế của các tụ này bằng cách đóng mở một chuỗi các khóa điện. Giải pháp của Walton-Cockcroft có tính đột phá cao, giải quyết được những thách thức của thời đại, và do đó nó được giảng dạy trong nhiều môn học liên quan đến điện, điện tử, vật lý hạt nhân, vật lý máy gia tốc. Tuy nhiên, khi truyền đạt kiến thức đến người học, việc mô tả hoạt động của phương pháp Walton – Cockcroft gặp nhiều khó khăn do cùng lúc ta phải theo dõi sự thay đổi điện áp trên nhiều bản tụ. Một số công cụ mô phỏng cho quá trình nhân điệp áp của máy gia tốc Walton-Cockcroft đã được xây dựng trước đó [4] và [5], tuy nhiên do các công cụ này được viết bằng ngôn ngữ Matlab nên việc tiếp cận và sử dụng còn gặp nhiều khó khăn đối với các giảng viên và học sinh, sinh viên tại Việt Nam. Do đó, để thuận tiện lợi cho các giảng viên và sinh viên tại các Trường Đại học của Việt Nam sử dụng, trong công trình nghiên cứu này chúng tôi xây dựng một phần mềm mô phỏng đơn giản, có thể được sử dụng một cách dễ dàng nhưng vẫn biểu diễn một cách trực quan quá trình nhân điệp áp của máy gia tốc Walton-Cockcroft.

Để thực hiện mục tiêu này, chúng tôi lựa chọn công cụ Python [6] bởi đây là một trong những ngôn ngữ lập trình được sử dụng phổ biến và có cấu trúc lệnh thân thiện với người dùng. Phần còn lại của bài viết sẽ có cấu trúc như sau. Phần II trình bày chi tiết về phương pháp Walton-Cockcroft, tiếp đó phần III sẽ mô tả cách thức mô phỏng phương pháp Walton-Cockcroft trong Python, phần IV sẽ

minh họa việc sử dụng gọi lệnh trong quá trình giảng dạy, sau cùng là các kết luận.

2. Cơ sở lý thuyết và Phương pháp gia tốc Walton – Cockcroft

Giả sử ta có các điện cực có thể nạp đến hiệu điện thế tối đa là U_0 . Phương pháp Walton-Cockcroft cho phép ta ghép một chuỗi n các tụ như vậy để tạo ra chênh lệch điện thế bằng nU_0 . Ví dụ, ta có thể tạo ra một hiệu điện thế bằng 1 MV bằng cách ghép nối 5 tụ có $U_0 = 200$ kV. Để đơn giản ta sẽ xét một mạch Walton-Cockcroft gồm 4 tụ chính (C1, C2, C3, và C4) như Hình 1.



Hình 1. Minh họa mạch Walton-Cockcroft gồm 4 tụ.

Mỗi tụ chính có thể nạp được tới hiệu điện thế tối đa là U_0 . Để nạp điện ta các tụ này, ta ghép nối bốn tụ chính với ba tụ phụ (C1', C2', và C3') thông qua chuỗi 5 công tắc (B1, B2, B3, B4, và B5), các công tắc này sẽ đồng thời nằm ở các vị trí 1 (D0, D1, D2, D3, và D4) hoặc 2 (D1, D2, D3, D4, và D5). Tụ chính C1' được ghép nối với một bộ nạp và vị trí D5 được nối tiếp đất. Ở thời điểm ban đầu, các khóa B sẽ nằm ở vị trí 1 và tất cả các tụ đều có hiệu điện thế bằng 0, trừ tụ chính C1. Gạt các công tắc B sang vị trí 2, khi đó hiệu điện thế trên tụ C1 và C1' sẽ bằng U_0 , các tụ còn lại vẫn có hiệu điện thế bằng 0. Tiếp tục gạt khóa B quay lại vị trí 1, khi đó tụ C1' sẽ truyền điện tích vào bản tụ C2, do đó điện thế trên tụ C1' và C2 là $U_0/2$. Tiếp tục chuyển các công tắc B về vị trí 1, lúc này tụ C1 lại được nối tiếp với bộ sạc, do đó điện thế của nó quay lại bằng U_0 . Tụ C2 lại chia sẽ điện tích với tụ C2' do đó hiệu điện thế trên tụ C2 và C2' là $U_0/4$. Tiếp tục chuyển các

công tắc B về vị trí 0, lúc này, tụ C2' lại chia sẻ điện tích cho tụ C3, hiệu điện thế trên tụ C3 và C2' lúc này bằng $U_0/8$, trong khi đó các tụ C1' và C2 có hiệu điện thế bằng $\frac{5U_0}{8}$. Ta tiếp tục lặp lại quá trình đóng mở khóa này nhiều lần, cho tới khi tất cả các tụ chính đều được nạp tới điện áp tối đa là U_0 , khi đó điện áp giữa hai đầu A1 – A3 sẽ bằng $4U_0$.

Dễ thấy, ở những bước thay đổi trạng thái các công tắc B ban đầu, việc theo dấu các giá trị hiệu điện thế của các tụ trong mạch Walton – Cockcroft là tương đối đơn giản. Tuy nhiên, khi số bước thay đổi trạng thái của công tắc tăng lên, sự thay đổi về điện thế diễn ra trên hầu hết các tụ điện khiến cho vấn đề trở nên phức tạp.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Mô tả gói lệnh

Gói lệnh được viết qua ngôn ngữ lập trình Python. Để đảm sự đơn giản, dễ cài đặt, dễ sử dụng và chỉnh sửa, gói lệnh không sử dụng bất kì thư viện nào khác ngoài thư viện đồ thị “matplotlib” [7].

Trong gói lệnh, sử dụng phương pháp lập trình hướng đối tượng, chúng tôi khởi tạo một lớp “WaltonMachine” chứa tất cả dữ liệu và các hàm cần thiết trong quá trình mô phỏng (Bảng 1 và Bảng 2). Khi sử dụng, người dùng cần khởi tạo một đối tượng cụ thể của “WaltonMachine” và cung cấp thông tin về số lượng tụ ở hàng trên cùng giá trị điện áp của nguồn điện. Sau khi khởi tạo, các dữ liệu ban đầu bao gồm vị trí của chuỗi công tắc và dữ liệu điện thế ở các vị trí, từ đây chương trình sẵn sàng để mô phỏng các bước tiếp theo. Người dùng có thể sử dụng hàm để thay đổi vị trí các công tắc được gắn ngay trong đối tượng. Sau đó chương trình sẽ cập nhật và lưu các giá trị điện thế trong đối tượng theo một thuật toán mô tả hoạt động thực tế của mạch Walton – Cockcroft được miêu tả ở trên.

Bảng 1. Các thuộc tính của lớp WaltonMachine

Thuộc tính	Kiểu dữ liệu	Miêu tả
upper_capacitors	Số nguyên	Số tụ ở hàng trên trong mạch
voltage	Số thực	Giá trị hiệu điện thế của nguồn
upper_contexts	Chuỗi số thực	Giá trị điện thế ở các nút mạng hàng trên
lower_contexts	Chuỗi số thực	Giá trị điện thế ở các nút mạng hàng dưới
context_history	Chuỗi số thực hai chiều	Lịch sử các giá trị điện thế

Bảng 2. Các hàm của lớp WaltonMachine

Hàm	Tham số	Miêu tả
<code>__init__</code>	upper_capacitor, voltage	Khởi tạo đối tượng
update	update_times (số nguyên), print_system (biến lô-gíc)	Cập nhật trạng thái mạch
print_system	step (số nguyên)	In trạng thái mạch ở bước bất kì
plot_history	step_range (chuỗi hai phần tử nguyên), only_odd_step (biến lô-gíc), have_max_voltage (biến lô-gíc),	Vẽ đồ thị các giá trị hiệu điện thế sử dụng thư viện matplotlib

have_sum_voltage
(biến lô-gíc),
upper_capacitors
(chuỗi số nguyên),
lower_capacitors(c
hữu số nguyên),
all_capacitors
(biến lô-gíc)

Các dữ liệu điện thế của tất cả các bước mô phỏng được lưu trong các mảng một chiều, có thể được sử dụng để trực quan hóa hệ thống thông qua hàm hiển thị hệ thống mạch và hàm vẽ đồ thị các giá trị hiệu điện thế. Về hiển thị hệ thống mạch, mặc định mỗi lần người dùng thay đổi vị trí công tắc, chương trình sẽ hiển thị hệ thống mạch và các giá trị điện thế mới. Người dùng cũng có thể sử dụng một hàm khác để nhìn lại hệ thống mạch trong quá khứ. Về vẽ đồ thị, sử dụng thư viện “matplotlib” và hàm được tích hợp trong chương trình, người dùng có thể vẽ và tùy chỉnh đồ thị các giá trị bao gồm hiệu điện thế mạch Walton – Cockcroft, hiệu điện thế các tụ thành phần theo từng bước mô phỏng và hiệu điện thế tối đa hệ thống có thể đạt tới. Thông qua các hàm trên, người dùng có thể quan sát và mô tả trực quan hệ thống và hoạt động của máy gia tốc Walton-Cockcroft, và ứng dụng vào các bài giảng thực tế.

Gói lệnh của chúng tôi đã được đưa lên nền tảng Github, sẵn sàng để người dùng có thể tải xuống tại [8].

3.2. Sử dụng gói lệnh

Trong phần này, chúng tôi sẽ minh họa việc sử dụng gói lệnh này trong quá trình giảng dạy. Để sử dụng, ta trước hết cần khai báo gói lệnh “walton” và “matplotlib” như sau

```
import matplotlib.pyplot as plt
from walton import WaltonMachine
```

Giả sử người dùng cần mô phỏng mạch Walton – Cockcroft với số tụ là 4 tụ và hiệu điện thế tối đa ta có thể nạp trên mỗi tụ

là 200 kV, một đối tượng “WaltonMachine” với các biến “upper_capacitors=4” và “voltage=200” sẽ cần phải được khai báo như sau:

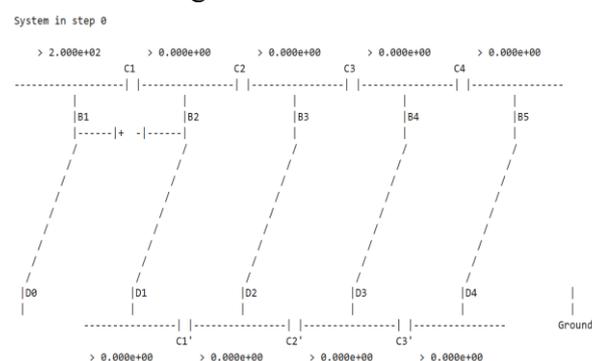
```
# Create an instance of walton machine
walton_machine = WaltonMachine(
    # Number of capacitors in the upper.
    # Must be integer
    upper_capacitors=4,

    # The voltage of the power source.
    voltage=200
)
```

Để quan sát mạch một cách trực quan, người dùng sử dụng lệnh “print_system”, như sau:

```
walton_machine.print_system(
    # Step of the machine wanted to view.
    step=0
)
```

Ở đây biến step được đặt bằng 0 thể hiện trạng thái ban đầu. Người dùng cũng có thể xem hệ ở bất cứ trạng thái nào bằng cách thay đổi biến step. Chương trình sau đó cung cấp mạch Walton – Cockcroft ở dạng đồ họa như biểu diễn trong Hình 2.



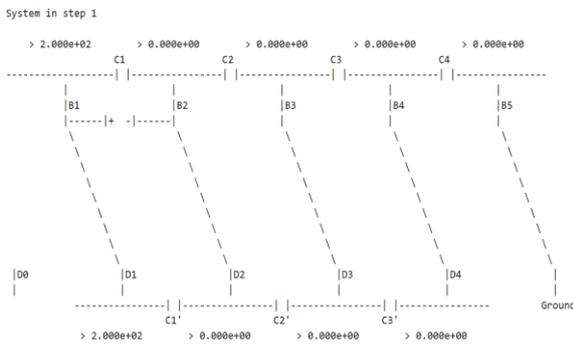
Hình 2. Mạch Walton-Cockcroft gồm 4 tụ cung cấp bởi gói lệnh mô phỏng ở trạng thái ban đầu.

Với giao diện đồ họa trực quan, người sử dụng có thể quan sát thấy trạng thái của các khóa B cũng như điện áp trên các mặt của các bản tụ. Để thay đổi trạng thái của khóa, người sử dụng sẽ sử dụng lệnh “update” như sau:

```
# Apply next switch
walton_machine.update(
  # You can update many times at once.
  update_times=1,

  # You can choose to view the final state or not.
  # Default is True
  print_system=True
)
```

Lệnh này cho phép người sử dụng khai báo số lần thay đổi trạng thái của khóa thông qua biến “update_times” và tùy chọn in hoặc không in kết quả ra màn hình qua biến lô-gic “print_system”. Kết quả thu được được thể hiện trong Hình 3, trong đó trạng thái của các khóa và giá trị điện áp trên các mặt của các bản tụ đã được thay đổi.

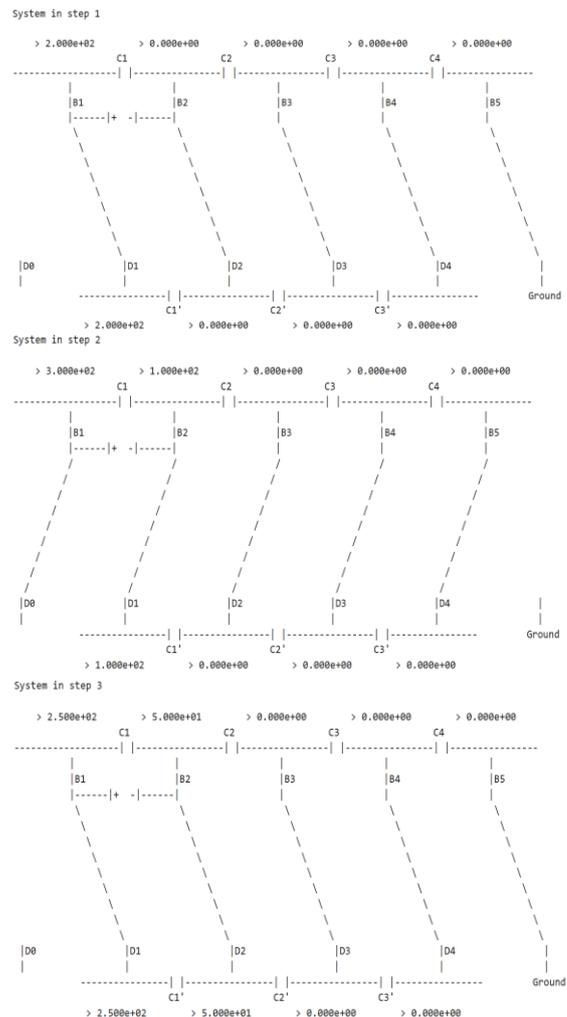


Hình 3. Mạch Walton-Cockcroft gồm 4 tụ cung cấp bởi gói lệnh mô phỏng sau khi đã thay đổi trạng thái khóa.

Bằng cách sử dụng lệnh “update” với biến “update_times=1” nhiều lần, người dùng có thể in ra màn hình một chuỗi các trạng thái của mạch Walton – Cockcroft và sử dụng chúng để giải thích về sự thay đổi của hiệu điện thế trên các tụ như minh họa trong Hình 4.

Để đạt được chênh lệch điện thế tối đa, số lần thay đổi trạng thái khóa B là rất nhiều và do đó không thể hoàn toàn theo dõi từng bước như minh họa trong Hình 4. Gói lệnh cho phép biểu diễn sự thay đổi hiệu điện thế của các tụ trong mạch cũng như sự thay đổi của hiệu điện thế tổng cộng thông qua lệnh “plot_history”. Chi tiết cách khai báo tham số sử dụng đi cùng với gói lệnh. Hình 5 là kết quả xuất ra từ lệnh “plot_history” cho 250 bước thay đổi của trạng thái khóa B. Hình 5

cho thấy rõ ràng hiệu ứng thăng giáng điện thế mỗi khi khóa B chuyển trạng thái. Điều này là do có sự cân bằng điện tích giữa các bản tụ phía phải của tầng trên với các bản tụ phía trái của tầng dưới. Sự thăng giáng này giảm dần theo số bước tăng lên do sau một số lần thay đổi trạng thái khóa đủ lớn, chênh lệch điện áp giữa các bản tụ phía phải của tầng trên và các bản tụ phía trái của tầng dưới nhỏ dần. Đồ thị trong Hình 5 cũng giúp ta dễ dàng quan sát thấy rằng khi hiệu điện thế tổng tiến dần đến giá trị cực đại $4U_0$, hiệu điện thế trên các tụ cũng tiến dần đến mức cực đại của chúng U_0 .

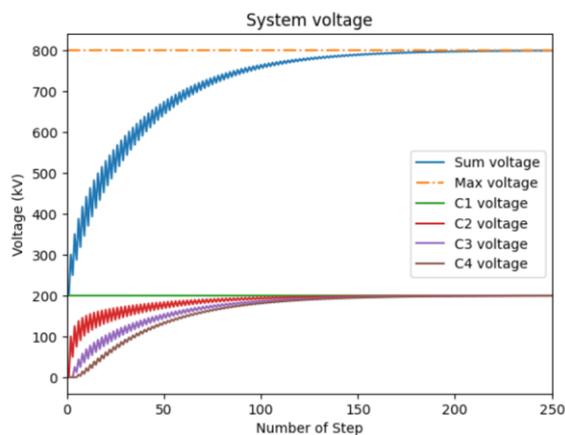


Hình 4. Chuỗi các trạng thái của mạch Walton-Cockcroft khi vị trí khóa thay đổi.

Như minh họa ở trên, gói lệnh cung cấp cho người sử dụng (người dạy và người học) những học liệu trực quan, có khả năng thay đổi linh hoạt, qua đó giúp nâng cao khả năng

truyền đạt và nắm bắt ý tưởng của người dạy và người học.

Ngoài ra, gói lệnh được viết dưới dạng các lớp và hoàn toàn mở, do đó đối tượng người dùng chuyên ngành hoàn toàn có thể chỉnh sửa gói lệnh để quan sát các hiệu ứng khác của máy gia tốc Walton-Cockcroft cũng như mở rộng gói lệnh để sáng tạo các cấu hình dựa trên cơ sở của mạch Walton-Cockcroft.



Hình 5. Sự thay đổi của hiệu điện thế tổng và hiệu điện thế trên từng tụ của mạch Walton-Cockcroft trong 250 bước thay đổi.

4. Kết luận

Chúng tôi đã sử dụng Python để xây dựng một gói lệnh cho phép mô phỏng cơ chế nhân điện áp của máy gia tốc Walton-Cockcroft. Gói lệnh cho phép quan sát hoạt động của mạch Walton – Cockcroft theo từng bước với giao diện đồ họa trực quan cùng khả năng tùy biến các tham số của mạch. Không những vậy, gói lệnh còn cung cấp tính năng biểu diễn hiệu điện thế trên các tụ và hiệu điện thế tổng cộng của mạch Walton – Cockcroft theo số bước thay đổi trạng thái của khóa. Các tính năng của gói lệnh giúp tạo ra các học liệu trực quan, sinh động, có thể được sử dụng để nâng cao chất lượng giảng dạy.

Tài liệu tham khảo

1. Evans, L., & Bryant, P. (2008). LHC machine. *Journal of instrumentation*, 3(08), S08001.
2. Thwaites, D. I., & Tuohy, J. B. (2006). Back to the future: the history and development of the clinical linear accelerator. *Physics in medicine & biology*, 51(13), R343.
3. Cockcroft, J. D., & Walton, E. T. (1932). Experiments with high velocity positive ions. (I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions. *Proceedings of the royal society of London. Series A, containing papers of a mathematical and physical character*, 136(830), 619-630.
4. Mohammed ALSaadi (2016). High voltage generation marks cockroft doubler.
5. M V Chilukuri (2024). Cockroft-Walton Voltage Multiplier Circuit.
6. Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
7. J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D Graphics Environment", *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007.
8. https://github.com/FatCoding3/walton_machine