یادگیری فیزیک‌آگاه با قیود سخت برای مدیریت انرژی ریزشبکه متصل به شبکه

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری · دانشگاه بناب · دانشکده علوم پایه

گروه ریاضی و علوم کامپیوتر · پروژه کارشناسی علوم کامپیوتر · شهریور ۱۴۰۵

یک خانه با بار، فتوولتائیک، باتری و یک اتصال شبکه — نه ریزشبکه میدانی

نگارش

محمد امیر بابازاد

استاد راهنما

دکتر بابک آذرنوید

استاد راهنما

دکتر زهرا مختارنژاد

ساختار گزارش

پنج فصل، به ترتیب مسئله تا نتیجه

۱. کلیات

مسئله، هدف، پرسش‌ها، سهم کار و قلمرو

۲. مبانی و پیشینه

توازن، باتری، هزینه، قید سخت، برنامه‌ریزی پویا

۳. روش‌شناسی

دو شبکه، لایه خروجی، افراز، شاخص‌ها

۴. پیاده‌سازی و نتایج

داده، دقت، قیود، هزینه، آزمایش حذفی

۵. نتیجه‌گیری

چه چیزی نشان داده شد و چه چیزی ادعا نمی‌شود. پیوست: پارامترها و شبه‌کد لایه.

فصل ۱ · هدف

پرسش‌های تحقیق

چگونه می‌توان خروجی شبکه را چنان پارامتر کرد که قیود باتری و توازن توان در همه گام‌ها برقرار باشند؟

تفاوت شبکه داده‌محور آزاد و شبکه فیزیک‌تعبیه‌شده از نظر باقیمانده توازن، نقض قیود و هزینه چیست؟

فاصله هزینه کنترل‌کننده یادگرفته‌شده از مرجع برنامه‌ریزی پویا روی همین داده چقدر است؟

هدف اقتصادی جایگزینی قطعی حل‌کننده نیست؛ تقریب سریع یک برنامه مرجع و سنجش هزینه این تقریب است.

فصل ۱ · سهم کار

چهار کار این گزارش

۱

تبدیل قیود توازن و باتری به لایه خروجی قطعی، نه فقط جریمه در زیان

۲

مرجع برنامه‌ریزی پویا برای برنامه مقید و مقایسه اقتصادی

۳

آزمون بازگشتی: وضعیت شارژ هر ساعت از خود مدل می‌آید

۴

مطالعه موردی شفاف در مقیاس خانه، با فرض‌های مهندسی صریح

مقاله اولادجو فقط برای آشنایی با مسئله است؛ نظریه بازی‌اش پیاده نشده.

پیام اصلی

شبکه عصبی توان شبکه، شارژ، دشارژ و وضعیت شارژ را جداگانه بدهد، حتی با خطای کم ممکن است فرمانی بسازد که روی باتری قابل اجرا نباشد. اگر

راه‌حل این گزارش: شبکه فقط یک فرمان علامت‌دار باتری را می‌آموزد؛ بقیه کمیت‌ها از فیزیک مدل درمی‌آیند.

واژه‌ها، قبل از فرمول

معنی اصطلاحات در این گزارش

واژه	معنی

فصل ۱ · سامانه

خانه متصل به شبکه، نه محله

چهار جزء

بار محلی (P_L)

فتوولتائیک (P_{PV})

باتری با وضعیت شارژ (s)

یک نقطه تبادل با شبکه (P_G)

تصمیم هر ساعت

باتری شارژ شود یا دشارژ، و کمبود یا مازاد چگونه با شبکه بسته شود. ولتاژ، فرکانس و حفاظت خارج از قلمرو است.

قرارداد علامت

چهار خروجی تصمیم

P_G) ،خرید از شبکه ($P_G>0$)

(P_G)

توان خالص شبکه

(P_c, P_d)

شارژ و دشارژ، هر دو نامنفی

($s(t+\Delta t)$)

وضعیت شارژ گام بعد

.مدل آزاد این چهار کمیت را جدا پیش‌بینی می‌کند. مدل پیشنهادی فقط یک فرمان می‌دهد

فصل ۲ · توازن توان

ورودی‌ها با خروجی‌ها باید برابر باشند

سمت چپ منبع است (خرید، فتوولتائیک، دشارژ) و سمت راست مصرف (بار و شارژ):

$$P_G+P_{PV}+P_d=P_L+P_c$$

اگر برابر نباشد، باقیمانده این است:

$$r_G=P_G+P_{PV}+P_d-P_c-P_L$$

در این مدل سقف واردات یا صادرات برای P_G نیست؛ توازن با تبادل شبکه بسته می‌شود. این محدودیت کار است.

فصل ۲ · باتری

مدل انرژی گسسته، نه الکتروشیمی

[s(t+Δ t)=s(t)+ η_cP_cΔ tE_max- P_dΔ tη_dE_max]

حد ایمنی

0.20)≤ s≤ 0.90) 0) و≤ P_c,P_d≤ 1 kW)

(P_cP_d=0) :قید انحصار

.در یک ساعت هم شارژ و هم دشارژ مجاز نیست

.دما و پیری نیست .(s_0=0.50) بازده هر طرف (0.95)، گام یک ساعت، شروع ،(E_max=2 kWh)

فصل ۲ · هزینه

خرید، فروش، و جریمه عبور از باتری

$$g_t = c_b[P_G]_+ \Delta t - c_s[-P_G]_+ \Delta t + \kappa(P_c + P_d)\Delta t$$

بخش مثبت است: فقط وقتی شبکه مثبت است خرید، و فقط وقتی منفی است فروش. ($[z]_+ = \max(0,z)$)

تعرفه فرضی

کم‌باری (0.16)، عادی (0.22)، اوج (0.34) (ساعت ۱۷ تا ۲۱ محلی)، آخر هفته (0.20)؛ فروش (0.06). قبض واقعی نیست.

($\kappa = 0.008$)

نماینده ساده استهلاک عبوری است، نه مدل پیری.

فصل ۲ · پیشینه، کوتاه

جای این کار کجاست؟

برتری عمومی بر OptNet یا یادگیری تقویتی ایمن ادعا نشده است.

رویکرد | قیدها | نقش در این پروژه

نام روش

این کار PINN حل معادله نیست

رایج (رئیسی ۲۰۱۹) PINN

معادله دیفرانسیل

باقیمانده در تابع زیان

قید معمولا نرم

این گزارش

قوانین جبری ساعتی

فیزیک در لایه خروجی

قید سخت برای مدل باتری

برچسب از برنامه‌ریزی پویا

. از خانواده یادگیری فیزیک‌آگاه است. نام دقیق: شبکه فیزیک‌تعبیه‌شده با قید سخت

جریمه نرم در برابر قید سخت

فیزیک را کجا بگذاریم؟

جریمه نرم

نقض با یک ضریب به زیان اضافه می‌شود. خطا کم می‌شود، ولی صفر شدن نقض تضمین ندارد.

قید سخت

قید در خود خروجی است. لایه بدون وزن آموزش‌پذیر، فرمان را به چهار کمیت مجاز می‌نگارد.

جریمه نرم روی همین معماری در این گزارش آموزش داده نشد؛ فقط انگیزه روش است.

شکست مدل آزاد

چهار جور ناممکنی

توان منفی

$(P_c<0)$ یا $(P_d<0)$

هم‌زمانی

شارژ و دشارژ در یک ساعت هر دو مثبت

وضعیت شارژ خارج بازه

کمتر از (0.20) یا بیشتر از (0.90)

باقیمانده توازن

$(r_G \neq 0)$

خطای تقریب کم، به‌تنهایی گواه امکان‌پذیری نیست.

فصل ۳ · مدل پیشنهادی

شبکه یک عدد می‌دهد؛ فیزیک بقیه را می‌سازد

[u(t)=P_max tanh(z(t))]

جهت است: مثبت شارژ، منفی دشارژ. قدر مطلق شدت توان است. (u) خروجی آزاد شبکه است. علامت (z)

.نمی‌رسد و فقط نزدیک می‌شود (± P_max) بازه تانژانت هیپربولیک در (± 1) باز است؛ فرمان دقیقا به

لایه سخت

سقف وابسته به وضعیت شارژ، سپس انحصار

$$P_c(s)=\max(0,\min(P_{max}, (s_{max}-s)E_{max}\eta_c\Delta t))$$

$$P_d(s)=\max(0,\min(P_{max}, (s-s_{min})E_{max}\eta_d\Delta t))$$

$$P_c=\min([u]_+,P_c),\ P_d=\min([-u]_+,P_d)$$

صفر است، هم‌زمانی رخ نمی‌دهد. وزن آموزش‌پذیر در این لایه نیست ($[-u]_+$) و ($[u]_+$) چون یکی از

مثال عددی

یک ساعت مشخص، تا لایه «حساب» دیده شود

بار (0.80)، فتوولتائیک (0.30) ،(u=+0.40) فرمان ،(s=0.50)

.(P_d=0) و (P_c=0.40) سقف شارژ باقی‌مانده: ((0.50-0.90)× 2 / 0.95 = 0.842). پس

[s_+=0.50+0.95× 0.40/2=0.69, P_G=0.90]

.توازن برقرار است: (0.40+0.80=0+0.30+0.90). انحصار هم برقرار است چون فرمان مثبت است

مثال حدی

باتری خالی دشارژ نمی‌شود

اگر (s=s_min=0.20) و فرمان کامل دشارژ (u=-1):

[[P_d=min(1, (0.20-0.20)× 2× 0.951)=0 P_d=0

همین برای (s=0.90) و (u=+1): سقف شارژ صفر است. تست حدی در کد همین دو حالت را بررسی می‌کند.

پس از فرمان مجاز

وضعیت شارژ بعد و توان شبکه

$$s(t+\Delta t)=s(t)+\eta_c P_c \Delta t E_{max}-P_d \Delta t \eta_d E_{max}$$

$$P_G=P_L+P_c-P_{PV}-P_d$$

سازگار کند؛ در این گزارش نیست P_G برقرار می‌شود. اگر سقف اتصال باشد، لایه باید فرمان باتری را با بازه مجاز P_G توازن با تعریف.

زیان آموزش

فقط فرمان مرجع کمینه می‌شود

[L_u= 1Nsum _i=1^N(tanh(z_i)- u_i^*P_max)^2]

فرمان برنامه‌ریزی پویاست. چهار خروجی فیزیکی بعد از لایه ساخته می‌شوند و در این زیان نیستند. (u^*)

.مدل آزاد میانگین مربع خطای چهار مؤلفه استانداردشده را کمینه می‌کند

ترمیم مدل آزاد

پس‌پردازش فقط برای هزینه

[u_safe=clip(P_c-P_d,-P_max,P_max)]

سپس همان لایه سخت. وضعیت شارژ مسیر ترمیم از دینامیک باتری می‌آید، نه از خروجی چهارم شبکه.

.نقض‌های جدول امکان‌پذیری روی خروجی خام است. هزینه روی مسیر ترمیم‌شده است تا فرمان ناممکن ارزان به نظر نرسد

دو شبکه

همه‌چیز یکسان، جز خروجی

وزن‌ها با بازه ((n_in+n_out)/6)؛ آدام با نرخ (1.2× 10^-3). فقط نام‌پای.

داده‌محور آزاد | فیزیک‌تعبیه‌شده

مرجع برنامه‌ریزی پویا

افق کامل، روی شبکه گسسته

[V_t(s)=min_u U(s)g_t(s,u)+V_t+1(f(s,u))]

حالت: وضعیت شارژ با گام (0.01) از (0.20) تا (0.90) — ۷۱ نقطه

فرمان: ۴۱ مقدار روی ([-1,1]) کیلووات

؛ ارزش اسقاط باتری نیست(V_T(s)=0) شرط نهایی

.پس مرجع تقریب عددی افق کامل است، نه بهینه پیوسته دقیق. فاصله ۲٫۸٪ نسبت به همین شبکه است

کران نزدیک‌بین

حریصانه آینده را نمی‌بیند

در هر ساعت همان ۴۱ فرمان مجاز را می‌آزماید و فقط هزینه همین ساعت را کمینه می‌کند.

رفتار

شارژ اکنون فقط هزینه است. انرژی آغازین تخلیه می‌شود و سیاست نزدیک بدون‌باتری می‌ماند.

نتیجه

هزینه (45.099) در برابر بدون باتری (45.233). ارزش باتری در این تعرفه بین‌ساعتی است.

بردار ورودی

دوازده ویژگی

$$x(t)=(2h/24, 2h/24, d, P_L, P_{PV}, c_b, c_s, s, P_L^{t+1}, P_{PV}^{t+1}, P_L^{t+3}, P_{PV}^{t+3})$$

نشانگر روز کاری، نه شماره روز هفته. (d) ساعت روز است و (h)

همان مقدار واقعی سری‌اند. این فرض میدان نیست؛ برای مقایسه آفلاین با مرجعی است که خودش افق کامل را می‌بیند $(t+3)$ و $(t+1)$ مقادیر.

پروتکل آموزش

افراز زمانی؛ آزمون در انتخاب مدل نیست

آموزش
۱۹۷۳
ساعت · ۶۰٪ اول

اعتبارسنجی
۶۵۷
۲۰٪ بعدی

آزمون
۶۵۹
۲۰٪ پایانی

آدام، دسته ۶۴، حداکثر ۴۵۰ دوره؛ توقف زودهنگام ۵۵ دوره بدون بهبود اعتبارسنجی

پنج بذر پایه ۷، ۱۱، ۱۹، ۲۳، ۲۹؛ فیزیک‌تعبیه‌شده بذر+۱۷ و حذفی بذر+۳۱

آزمون بازگشتی: وضعیت شارژ ورودی از خود مدل می‌آید

آموزش در برابر آزمون

مسیر مرجع در آموزش؛ بازگشت در آزمون

در آموزش، وضعیت شارژ ورودی از مسیر مرجع برنامه‌ریزی پویا می‌آید. در آزمون بازگشتی، از خود مدل می‌آید.

پس بخشی از شکاف هزینه می‌تواند از همین جابه‌جایی توزیع باشد، نه فقط از خطای یک‌گامی.

اگر پرسیدند چرا به مرجع نمی‌رسید، اول این را بگویید، بعد گسستگی مرجع و افق کامل آن را.

شاخص‌ها

چه چیزی را گزارش می‌کنیم؟

دقت

میانگین قدر مطلق خطا برای توان شبکه، فرمان و وضعیت شارژ. میانگین مربع چهارتایی به‌خاطر ناهم‌واحدی در جدول اصلی نیست.

امکان‌پذیری

(|r_G|)، نقض وضعیت شارژ، توان منفی، هم‌زمانی

هزینه

جمع (g_t) روی ۶۵۹ ساعت آزمون، فقط برنامه‌های قابل اجرا

کران‌ها

مرجع پایین تفسیری؛ بدون باتری و حریصانه بالا

فصل ۴ · داده

مطالعه موردی ترکیبی، مقیاس خانه

اگر UCI و NASA POWER در دسترس باشند اسکریپت از آن‌ها می‌سازد؛ در این اجرا میزبان‌ها بسته بودند.

مؤلفه | چه شد | چه نیست

پیوست · پارامترها

اعداد ثابت آزمایش

کمیت | مقدار

نتیجه · دقت

نزدیکی به برنامه مرجع روی آزمون

میانگین مربع تجمیعی داده‌محور (0.0133± 0.0008) و فیزیک‌تعبیه‌شده (0.0145± 0.0016)؛ مدل آزاد کمی نزدیک‌تر است.

مدل | MAE (s) | MAE (u) | MAE (P_G)

خواندن جدول دقت

چرا در برنامه انحصاری دو ستون یکی است؟

اگر $(P_cP_d=0)$ آن‌گاه $(u=P_c-P_d)$ و

$$P_G-P_G^*=(P_c-P_d)-(P_c^*-P_d^*)=u-u$$

پس برای مرجع، بدون‌باتری، حریصانه و فیزیک‌تعبیه‌شده، $(MAE(P_G)=MAE(u))$. مدل آزاد خام انحصار ندارد و دو ستون فرق می‌کنند.

نتیجه · قیود

اینجا اختلاف اصلی است

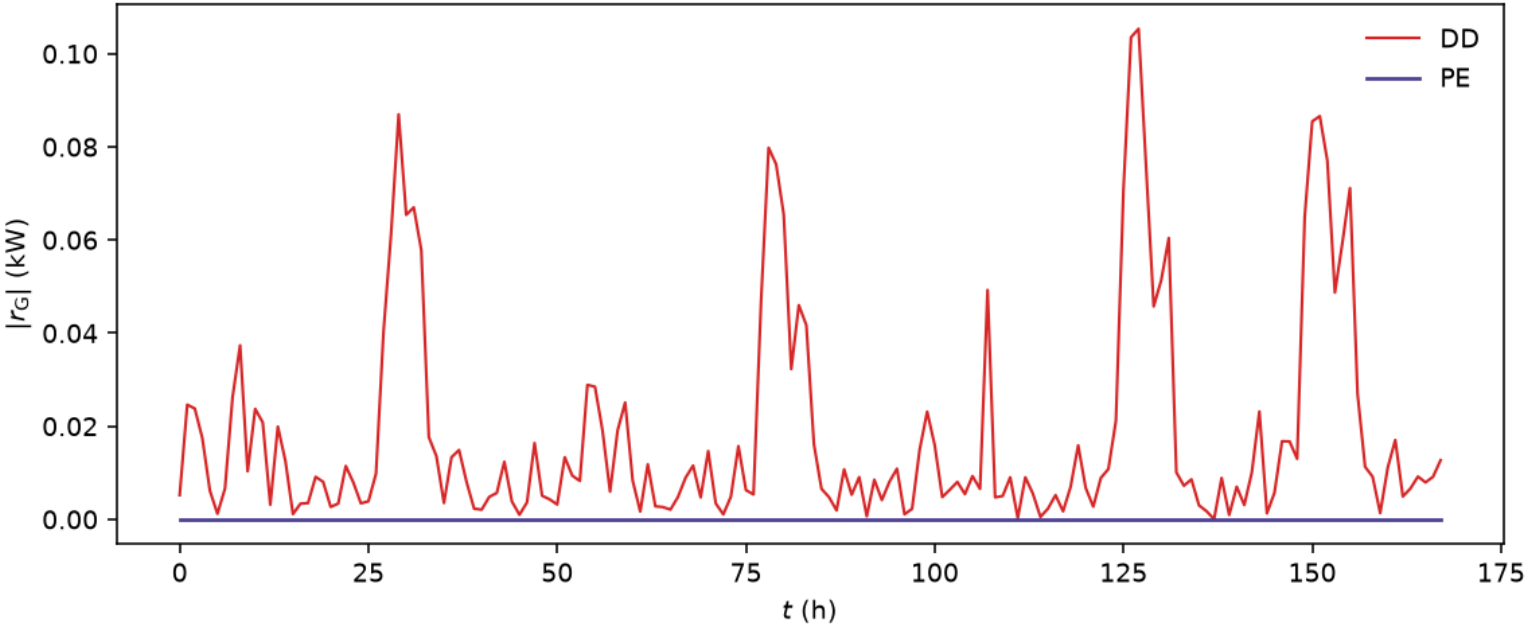
صفر بودن نقض کشف آماری نیست؛ از خود لایه می‌آید.

مدل | (|r_G|) | نقض P_d<0) | (P_c<0) | SOC %) | هم‌زمانی

شکل ۴ · باقیمانده

توازن در هفته نخست آزمون

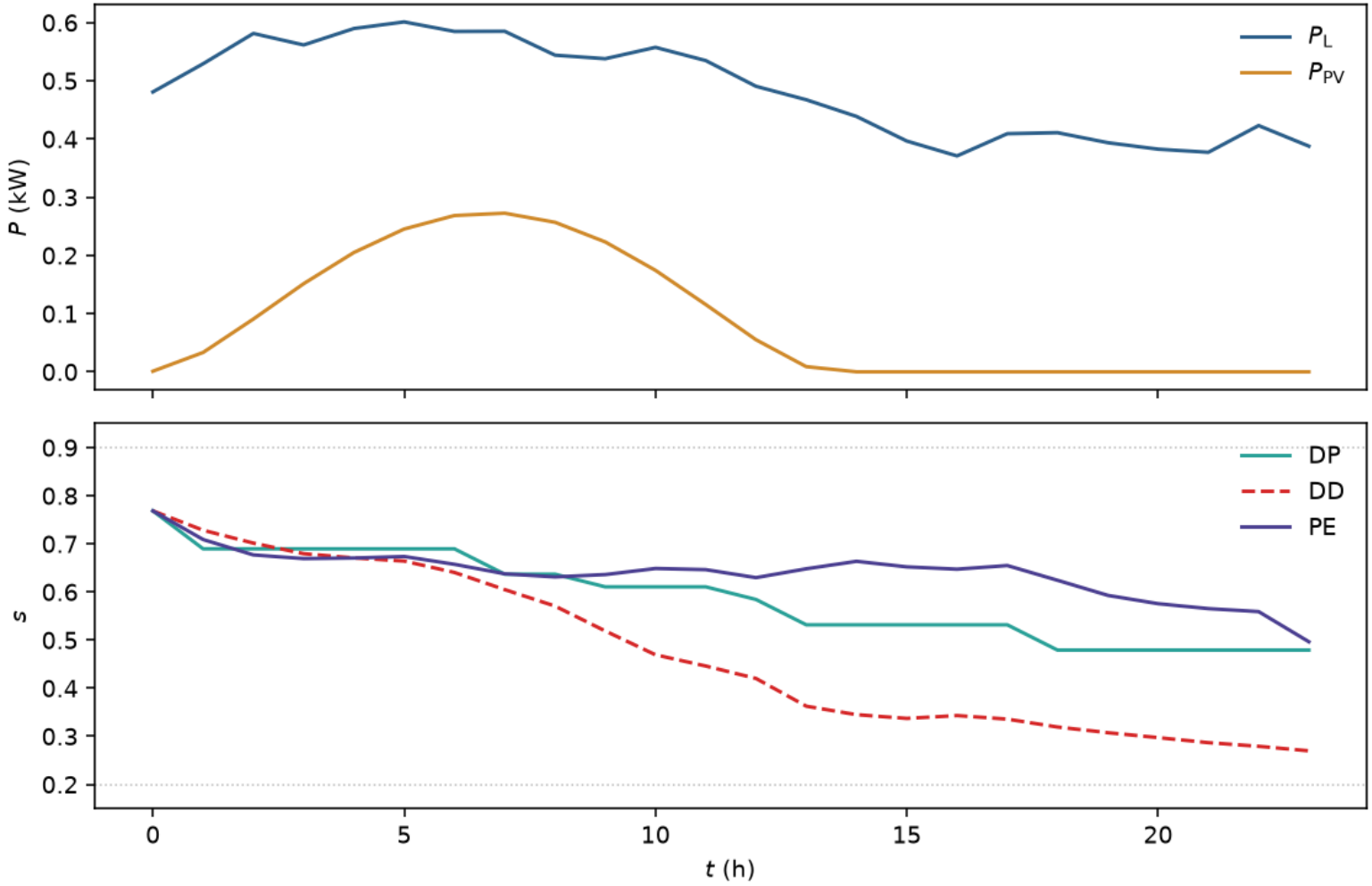
فیزیک‌تعبیه‌شده. این ساعت‌ها از مجموعه آزمون‌اند PE ،خروجی خام داده‌محور DD.



شکل ۴ · مسیر نمونه

نخستین روز آزمون

بالا بار و فتوولتائیک؛ پایین وضعیت شارژ مرجع، داده‌محور ترمیم‌شده و فیزیک‌تعبیه‌شده. یک روز نمونه است نه میانگین.



نتیجه · هزینه

افق آزمون ۶۵۹ ساعته

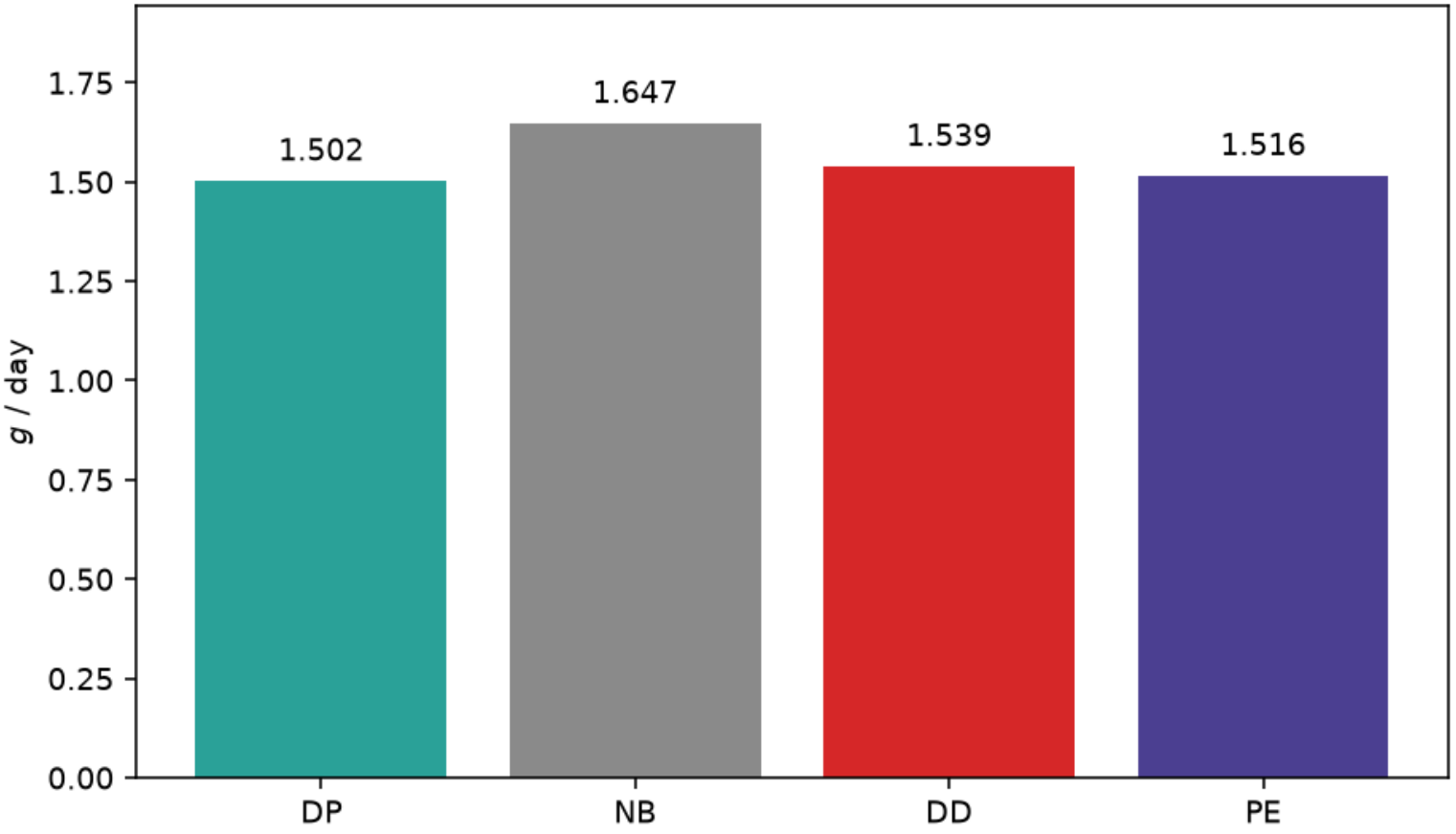
فیزیک‌تعبیه‌شده حدود ۶٫۲٪ از بدون‌باتری ارزان‌تر است. اختلاف با مدل ترمیم‌شده با پنج بذر قاطع نیست و آزمون فرض جداگانه گزارش نشده.

مدل | هزینه کل | فاصله از مرجع

شکل ۴ · هزینه روزانه

میانگین برنامه‌های قابل اجرا

فیزیک‌تعبیه‌شده. ستون‌ها نزدیک‌اند PE ،داده‌محور ترمیم‌شده DD ،بدون باتری NB.



آزمایش حذفی

بدون نگاه‌به‌جلوی \(t+1\) و \(t+3\)

سری حذف نگاه‌به‌جلو هزینه را بدتر نکرد. فاصله ۲٫۸٪ را نمی‌توان به آن ورودی‌ها نسبت داد. این نتیجه به میدان بدون پیش‌بینی تعمیم داده نمی‌شود. در این

ورودی | هزینه | فاصله از مرجع | MAE (u)

زمان اجرا

یک‌بار مرجع در برابر یک گام شبکه

برنامه‌ریزی پویا، افق کامل

s ۰٫۵۴۰

۳۲۸۹ گام، همین محیط

یک گام کنترل‌کننده

µs ۲۱٫۵

(21.468 ± 0.402) بعد از گرم‌سازی

پایتون 3.11.2، نام‌پای 2.4.6؛ مدل پردازنده در آن محیط معلوم نبود. ادعای کنترل صنعتی نمی‌شود.

فصل ۵ · تفسیر

چه چیزی را می‌توان گفت

پارامتردهی فیزیکی می‌تواند تقریب عصبی را به برنامه قابل اجرا تبدیل کند.

روی این سری، نقض‌های تعریف‌شده در محاسبه شناور صفر است.

هزینه از بدون‌باتری بهتر و از مرجع کمی بدتر است.

پس‌پردازش ایمنی روی مدل آزاد هزینه‌ای مشابه می‌دهد؛ برتری قطعی معماری از پنج بذر نتیجه نمی‌شود.

حد ادعا

چه چیزی را نمی‌گوییم

نه

برتری صنعتی، داده میدانی، PINN حل معادله، جایگزینی برنامه‌ریزی پویا، یا عملکرد با خطای پیش‌بینی

چرا

داده ترکیبی خانه است، آینده‌نگری کامل است، تبادل شبکه نامحدود است، باتری بدون دما و پیری است، جریمه نرم آموزش نشده است.

ادامه کار، خارج از این آزمایش

آنچه انجام نشده

سقف (P_G) و سازگار کردن لایه سخت با آن

خطای پیش‌بینی به‌جای نگاه‌به‌جلوی بی‌خطا

بار و فتوولتائیک هم‌مکان

جاروب (E_max)، (P_max)، بازده و فاصله تعرفه

مقایسه با کنترل پیش‌بین یا برنامه‌ریزی آمیخته

این‌ها کار انجام‌نشده این گزارش‌اند، نه نتیجه پنهان.

جمع‌بندی

داستان در سه قدم

۱

شبکه آزاد می‌تواند نزدیک برچسب باشد و فرمان ناممکن بدهد.

۲

یک فرمان علامت‌دار به‌علاوه لایه باتری، قیود مدل‌شده را ساختاری برقرار می‌کند.

۳

روی این خانه ترکیبی، هزینه نزدیک مرجع است نه بهتر از آن.

پایان ارائه

پرسش‌ها

محمد امیر بابازاد · دانشگاه بناب · شهریور ۱۴۰۵

استادان راهنما: دکتر بابک آذرنوید · دکتر زهرا مختارنژاد