

原理成立，现有方案尚未获得工程验证

本次审核v1.1论文、画册、海报及计算模型，并复核v1.2修订。采用经典力学、电磁感应、能量守恒、电池能量与USB供电边界逐项复算，并对照作者研究、制造商技术资料及USB-IF文件。此审核没有样机、实测效率、电芯型号、完整CAD或原理图可供验收。

结论与适用范围

判断	证据与含义
物理原理符合科学规律	脚踏机械功可经发电机转换为电能；电池缓冲输出差额。没有凭空发电或能量放大。
基准数值有条件成立	25 W输入→14.4992 W源端口、45 W有限时长等结果，依赖明列的效率、辅机和储能假设。
两项实质错误已修正	修正源端口与线缆末端混用；修正300 N单脚载荷对应扭矩漏算。
尚不能认定工程可用	电机效率、结构强度、装配、低速平顺性、冷启动、电池倍率、热与电脑兼容性仍缺实测闭环。

v1.2修订的关键结果

事项	原值 / 原表达	本版
功率边界	Pu为电脑入口，且与45 W PDO混用	Pu统一为源端口；线缆及电脑内部损耗分开。
轴静载筛查	300 N弯矩配2.5倍平均扭矩；86.86 MPa	同一300 N切向载荷产生25.5 N·m扭矩；144.14 MPa。
10 Wh门槛	“启动门槛”未写绝对能量	E-Emin≥10 Wh；E≥13.84 Wh。不是空电池冷启动。
产品表达	14.5 W等效补电易被当作到账	14.5 W源端口条件值；未承诺电脑一定接受。

审核状态：符合基本物理原理；模型纠错完成；详细设计与样机性能未验收。软件检查通过只证明算式和实现一致。

ENERGY / SOURCE / CABLE / HUMAN INPUT

从机械功率，到电脑实际获得的能量

1. 逐级能量账本

$$25 \rightarrow 22.50 \rightarrow 18.00 \rightarrow 16.56 \text{ W} ; (16.56-0.80) \times 0.92 = 14.4992 \text{ W}$$

(A1)

依次为曲柄机械输入、传动后机械功率、发电机电输出、调理后母线及源端口。 $\eta_m/\eta_g/\eta_r/\eta_o=0.90/0.80/0.92/0.92$ 均为假设，并非实测曲线。发电机效率取决于转速、负载、电阻和温度，空载有电压并不证明负载下能达到80%[S1]。

45 W源端持续输出且储能不下降，反解需75.05 W机械输入。在25 W输入下，45 W输出的缺口由电池填补；这与能量守恒一致。25 W、机械至母线效率0.45至0.75的扫参给出9.61至16.51 W端口功率，只是参数情景范围，不是性能置信区间。

2. 线缆必须单列

$$I = P_{port} / V_{source} ; P_{sink} = P_{port} - I^2 R_{loop}$$

(A2)

源端口设定	仅假设Rloop=0.10 Ω时的末端结果
20 V / 45 W	I=2.25 A ; 线缆损耗0.50625 W ; Psink=44.49375 W。
15 V / 45 W	I=3 A ; 线缆损耗0.90 W ; Psink=44.10 W。
20 V / 14.4992 W	I=0.72496 A ; Psink=14.44664 W。再假设电脑内部ηL=0.93，贡献13.43538 W，为30 W内部负载的44.78%。

Rloop仅为演示值，并非标准线缆实测值。USB-IF测试文件明确考虑VBUS与地回路压降[S2]。端口合同表示能力上限，不保证实际取电。

3. 人体功率情景不能替代本产品工效结论

作者实验研究了17/25 W桌下踩踏及并行任务；其结论限于相应设备、人群和测试条件[S3,S4]。本方案50 rpm、85 mm短曲柄不是已验证的舒适组合。在同功率同踏频下，85 mm曲柄的等效切向力是170 mm的两倍。25 W与50 rpm给出56.17 N平均等效切向力，不能当作每脚恒定受力、峰值或人体代谢功率。

传动几何正确，不等于结构强度通过

4. 用同一载荷计算弯曲与扭转

$$T = 300 \times 0.085 = 25.5 \text{ N}\cdot\text{m} ; M = 300 \times 0.035 = 10.5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(A3)

$$\sigma_b = 32M/(\pi d^3) ; \tau_s = 16T/(\pi d^3) ; \sigma_{vm} = \sqrt{(\sigma_b^2 + 3\tau_s^2)} \text{ [S10]}$$

(A4)

对d=12 mm均匀实心圆轴，名义von Mises应力144.1399 MPa。该载荷例为曲柄水平、300 N足力近似切向、轴外悬臂35 mm；旧稿只将300 N用于弯矩，扭矩另取2.5倍平均值，漏掉该脚力本身的扭转作用。即使修正，也缺轴材、许用应力、安全系数、轴肩/键槽、带轮径向力、双侧支承和疲劳谱，故没有强度合格结论。

筛查项	条件计算与未解决问题
皮带增速	100/20×160/20=40；包角129.77°/122.96°，小轮啮合7.21/6.83齿。几何关系成立；带型、带宽与预紧尚未选定[S5]。
带张力差	一级节圆半径47.746 mm。平均4.775 N·m时约100 N；25.5 N·m静载例约534.07 N。轴承径向力还须计预紧与带方向。
局部包络	轴高132 mm、r85 mm、踏板厚18 mm，水平踏板上下表面极限约38/226 mm；对24 mm底座只剩14 mm名义余量。脚跟、倾角、罩壳及公差未计。
装配空间	160T大轮节径152.79 mm可落入局部高度；这不能证明两轴向平面的轮缘、轴承、发电机和外壳互不干涉。必须以完整三维装配校核。

5. 电池稳电，不会自动消除脚踏死点

双曲柄相差180° 仍可在上下位置同时接近竖向足力的死点。能否顺畅越过，取决于足力方向、角度波形、转动惯量及发电制动。储能只平滑电输出，不能直接补足机械角动能。近零转速须限转矩，不能采用无界的P/ω控制。

忽略传动损耗的理想惯量量级例：若25 W的功率缺口持续0.10 s，需要2.5 J。2000 rpm转子若仅允许降速10%，由ΔE=Jω²(1-0.9²)/2可得J≈0.000600 kg·m²[S6]。这是假设例，不是已选定飞轮；须用真实转矩角度曲线和反射惯量重新设计。

储能、启动与热设计必须闭合

6. 储能窗口是等效模型，倍率需要电芯证据

12.8 V×1.5 Ah≈19.2 Wh；按20%至90%等效能量定义得到13.44 Wh。实际能量应积分 $V_{bat} \cdot I_{bat} \cdot dt$ ，受负载、温度、老化、截止电压和单体一致性影响；不能从磷酸铁锂端电压线性读出这个窗口[S7]。

停踩45 W源端输出时，模型等效储能减少率 $(45/0.92+0.80)/0.95=52.3295$ W。以10 V仅作电流筛查约5.23 A，为1.5 Ah的3.49 C；这不是精确电池端电流模型。需最终电芯、BMS、连接件及电源路径在相应温度和截止条件下的倍率证据，芯片允许电流不能替代整包能力。

7. 有储备启动与空电池冷启动分别验证

$$E_{available} = E - 3.84 \text{ Wh} \geq 10 \text{ Wh} \rightarrow E \geq 13.84 \text{ Wh}$$

(A5)

无脚踏时10 min/45 W需约8.7216 Wh，10 Wh门槛仅留约1.2784 Wh模型余量。25 W且无USB负载的储能增加率为14.8144 W，从分析下限积累10 Wh约40.50 min；30 min仅增7.4072 Wh。模型不覆盖BMS断开、欠压电芯恢复、整流起电和控制器自举。PD控制器的dead-battery受电功能也不能证明脚踏源冷启动成立[S8]。

8. 过压与损耗不能靠功能芯片自动解决

0.010 V/rpm是假定等效整流空载常数。75 rpm×40倍=3000 rpm，得到30 V；BQ25798推荐输入上限24 V，30 V为绝对最大额定[S9]。必须设计独立输入调理、限压/卸载、回灌阻断，并核算最坏钳位、容差与瞬态。标称24 V TVS不能直接视为钳位24 V。当前未提供该电路。

定常情景	模型总损耗及辅机
25 W输入 / 14.4992 W端口 / 储能中性	10.5008 W；分布于传动、电机、功率级及辅机。
0 W输入 / 45 W端口 / 放电	约7.3295 W；不含外部线缆。
25 W输入 / 45 W端口 / 放电	约14.8979 W；须分位置进行温升计算。
满储能 / 无输出 / 仍输入40 W	若保持输入，最终须耗散40 W；母线盈余25.696 W。若卸载，实际机械输入随负载变化。

把可计算的结论变成可验收的证据

9. 进入样机前的必需工作

对象	需要提交的证据	通过条件
发电与能量链	实际电机参数、转速/转矩/效率图；各级功率与储能积分；含仪器校准及不确定度。	声明的功率在规定工况可重现；能量残差落入测量不确定度。
机械结构	完整CAD、皮带规格/带宽/预紧、轴材与连接方式、轴承及载荷谱。	干涉、峰值及疲劳计算闭合；不能仅比名义应力和一个材料强度。
平顺与可退出	转矩角度波形、踏频波动、启停、空载、满储能、故障卸载及足部退出试验。	不依赖突然锁脚或失控制动力维持电气输出；阻力在预设包络内。
储能与冷启动	最终电芯数据、包容量积分、低温/低能量/不平衡工况、BMS断开恢复。	45 W门槛及退出余量实测足够；明确初始状态和无法启动的边界。
电源与PD	原理图、输入钳位和动态功率预算；电子负载、示波器、协议分析及实际电脑记录。	稳态与瞬态符合所用协议条件；低储能提前降额/退出，兼容范围有实证。
声热与人体适配	各热点及触面温升；背景声与频谱；身高/鞋型/桌椅组合、真实并行任务。	限值与评价方法在试验前确定；通过数据后再形成舒适/安静等性能表达。

10. 目前可用的准确表达

“连续旋转脚踏，将人体机械功转换为电能；通过储能缓冲，为设备补充部分电能。”这一机制描述成立。数值应写“25 W机械输入及基准效率假设下，源端口储能中性功率约14.5 W”。45 W应写“缓冲输出目标”，同时给出初始储备、输出边界与条件。

轻松、持续、静音、适配所有电脑、无需预充即可即踩即用、机械强度合格等均无现成证据。本次修订保留产品名称、造型和系列口号；把数值和功能解释按正确物理边界呈现。

完成判据：本次已完成理论审核与文档/模型纠错；表中样机与详细设计证据仍待后续研发取得，不计入本次“通过”。

PRIMARY SOURCES / REPRODUCIBILITY

来源、复算与修订范围

[S1] maxon , Motors as Generators. 转速、负载压降与效率 , 2024。
<https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360004496254-maxon-Motors-as-Generators>

[S2] USB-IF , USB Type-C Functional Test Specification , Rev 0.91 , 2024 , p10压降预算。
<https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type%20C%20Functional%20Test%20Specification%202024%2003%2003.pdf>

[S3] Rovniak等 , 2023 , MSSE 55(1):20-31。使用作者论文PubMed摘要。
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35977110/>

[S4] Cho等 , 2017 , Applied Ergonomics 60:128-135。使用PubMed摘要。
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28166871/>

[S5] Mitsubishi , Timing Belt Design Manual。几何、带宽与张紧选型流程。
https://global.mitsuboshi.com/assetFiles/timing_belt_design_manual_en.pdf

[S6] OpenStax , College Physics §10.4。转动动能与功的关系。
<https://openstax.org/books/college-physics/pages/10-4-rotational-kinetic-energy-work-and-energy-revisited>

[S7] Texas Instruments , LiFePO4 Design Considerations , SLUAAR1 , 2023。
<https://www.ti.com/lit/pdf/SLUAAR1>

[S8] Texas Instruments , TPS25751数据手册 , §8.3.2、§8.3.4.4。
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps25751.pdf>

[S9] Texas Instruments , BQ25798数据手册 , Rev C , 额定/推荐范围及热管理。
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25798.pdf>

[S10] Jönköping University , Applied Mechanics §8.10。圆轴弯扭组合及von Mises公式。
<https://mechanics.ju.se/SolidMechanics/YieldCriteria.html>

复算与文件同步

访问及审核日期2026-10-22。model.py含端口与线缆分离、同载荷轴应力、储能门槛与守恒模型；test_model.py新增反例回归，audit_publications.py以Decimal独立核对关键算式。论文、画册、海报及下载包同步至v1.2，基准时长保留，但统一按源端口功率解释。新报告不构成第三方认证或学术同行评审。

重要限制：恒定效率模型不能预测瞬态协议、转矩纹波、实际电流曲线、电池衰减或人体耐力；守恒是必要条件，不是整机可用的充分条件。