

踏启 TREADSPARK

桌下连续旋转人体动力应急供电系统的理论框架

TREADSPARK: A Theoretical Framework for a Compact Under-Desk
Rotary Human-Powered Emergency Energy System

摘要

目的：探索在外部电源不可用时，如何将桌下脚踏动作转换为笔记本可接收的部分电能。方法：提出180° 双曲柄连续旋转、两级同步带增速、永磁发电、共享直流母线、电池缓冲及USB-C PD输出架构，建立机械功率、转换损耗、储能状态与受电负载之间的确定性模型。结果：在25 W机械输入及本文效率假设下，不消耗储备的等效USB端功率为14.50 W；以19.2 Wh标称电池的20%至90%能量窗口起算，停止脚踏时45 W输出的代数边界为15.41 min，25 W脚踏时为23.11 min。45 W持续能量平衡要求约75.05 W机械输入，超出本文轻踩情景。结论：踏启的设计价值在于可解释的部分能量补充与缓冲输出。论文提出可证伪的工程命题，不包含样机测量、长期工效或设备兼容性验证。

关键词：人体动力；桌下脚踏；机械发电；储能缓冲；USB Power Delivery；理论设计



图1 踏启统一外观。产品渲染表达工业设计意向；性能结论来自显式模型。

研究问题与证据边界

Abstract

This theoretical design study examines how seated rotary pedaling can provide part of a laptop’s electrical demand during an external power interruption. A two-stage belt transmission, permanent-magnet generator, buffered DC power path and USB-C PD output are proposed. A deterministic energy ledger separates mechanical input, conversion losses, stored energy and source-port delivery. Under explicitly assumed efficiencies, 25 W mechanical input corresponds to 14.50 W of storage-neutral USB delivery. A 19.2 Wh nominal battery with a 70% energy window supports a calculated 45 W output boundary of 15.41 minutes without pedaling, or 23.11 minutes with 25 W pedaling. These values are model results, not measured performance. The study contributes an integrated architecture, reproducible calculations and falsifiable test propositions. Ergonomic comfort, noise, durability and end-device compatibility remain empirical questions.

1. 三个问题，一条可审查的逻辑链

问题	研究产物	评价方式
RQ1 轻踩能贡献多少电能？	机械端至USB源端的分层能量账本	同一测量边界内输入、输出与损耗闭合
RQ2 如何维持稳定端口？	储能补差、功率预算与提前重协商策略	踏频扰动、负载跃迁及储能接近下限的台架试验
RQ3 如何成为桌下工业产品？	短曲柄、封闭传动、低重心和可读状态	人体尺寸、桌椅关系、滑移、噪声与维护检查

2. 研究路径与本文贡献

本文以已有的人体工效研究与电机、电源技术资料为约束，独立组织产品结构与实验命题。贡献包括连续旋转动作与传动布局的对应关系、能量收入与接口功率的明确区分、以及储能不足时的受控退出条件。研究不评判全球首次性，也不编制竞品清单。

证据类型	本文如何使用
已有研究事实	文献[1,2]为机械输入情景与工效问题提供线索；[3-10]约束元件与协议功能。
设计假设 / 研究目标	效率、辅机耗电、尺寸、重量、传动齿数、电池窗口和控制阈值均由本研究设定。
条件计算 / 待验证表现	功率与时长可复算；舒适、安静、稳定、兼容及寿命须另行测量。

连续旋转的机械结构

3. 动作、传动与力的路径

左右脚踏通过同一贯通轴连接，曲柄相位差180°，踏板以自身轴承保持可调整的足底角度。主轴由两侧轴承承载；不采用交替下压棘轮或椭圆连杆。两级同步带在不同轴向平面传递功率，中间轴上的小带轮与大带轮刚性同轴。总增速比为 $(100/20) \times (160/20)=40$ 。

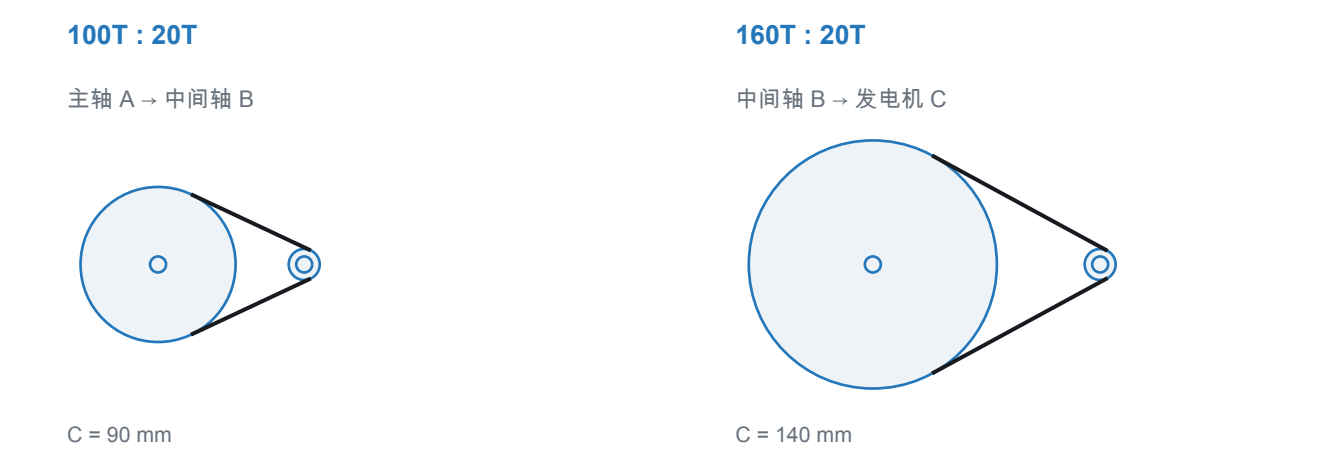


图2 两个轴向平面的原生工程示意。中间轴在两级间共享，图中为便于阅读分开展示；3 mm节距、中心距与齿数为几何例，不是已选型BOM。

项目	第一级	第二级
大小带轮齿数	100 / 20	160 / 20
中心距 / mm	90	140
大轮节径 / mm	95.49	152.79
小轮包角 / 啮合齿数	129.77° / 7.21	122.96° / 6.83
近似节线带长 / mm	376.21	581.92

按[4]的选型流程，后续仍需核对带型、最小齿数、带宽、许用张力和装配张紧；本几何筛查仅以小轮至少6齿啮合作为自定门槛。两根皮带长度须匹配实际标准规格后反求中心距，不把上述近似值直接下单。

$$P_m = \tau \omega = \tau \cdot 2\pi n / 60 ; F_{t,eq} = \tau / r$$

(1)

25 W、50 rpm、85 mm曲柄对应4.775 N · m平均转矩、56.17 N等效切向力。300 N切向单脚载荷同时产生25.5 N · m扭矩和35 mm悬臂下10.5 N · m弯矩；12 mm实心轴名义von Mises应力为144.14 MPa。未计带预紧、应力集中与疲劳，不能据此判定轴强度合格。

发电、储能与输出的分层架构

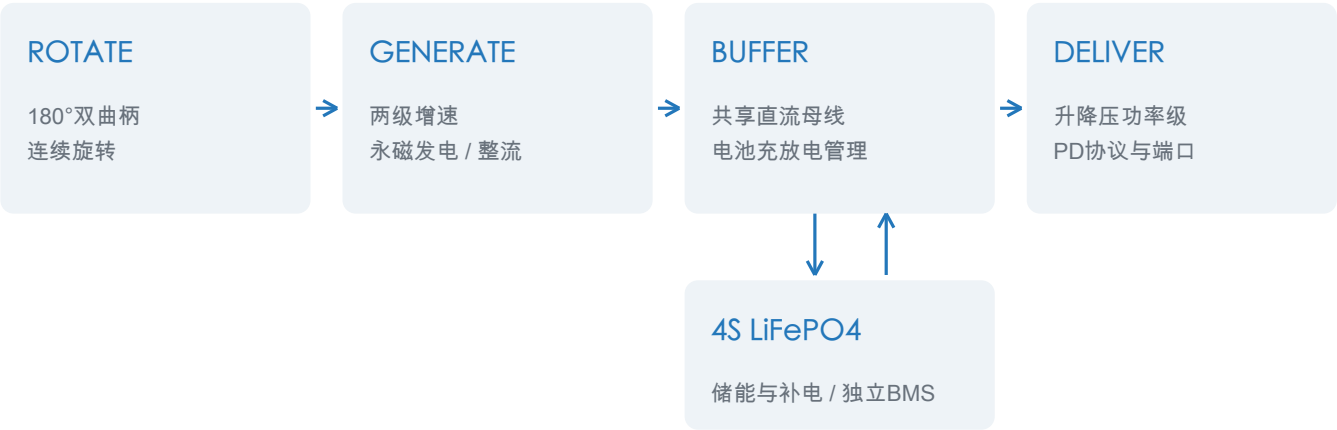


图3 功能拓扑。电池支路吸收盈余并补足输出差额；协议控制器管理端口，升降压功率级管理电能转换。箭头不代表完整原理图。

4. 每一层承担清楚的工程职责

永磁发电机的空载电压随转速变化；带负载后还受绕组电阻、整流损耗及温升影响[3]。50 rpm脚踏经40倍增速得到2000 rpm发电机转速，45至75 rpm的设计探索区间对应1800至3000 rpm。若等效整流空载常数假设为0.010 V/rpm，最高端为30 V，已达BQ25798绝对最大值，超过其24 V推荐上限。须独立限压、泄放及超速卸载；钳位最大电压与瞬态余量必须核定，30 V不能作为工作点[6]。

模块	可参考的功能与必要补充
输入整流及充电功率路径	三相整流、输入限流与电压约束；BQ25798的NVDC/电池补电功能可作实现参考[6]。太阳能VOC MPPT不直接当作人体最佳阻力算法。
电池缓冲	4S磷酸铁锂，独立电芯监测、温度、均衡、过充过放及熔断。1.5 Ah只是能量例；若低端10 V供45 W，等效耗能流率约52.33 W，以10 V筛查约5.23 A (3.49 C) ；电芯、BMS与完整路径须按至少6 A目标实测选型。
输出功率级与PD协议	TPS55288可作可编程升降压参考[7]；TPS25751可作CC协商/端口路径参考[8]。MCU协调两层预算，不能因芯片能力推定整机已认证或已验证联用。

能量模型的“共享母线”表示输入供电与电池补电可同时服务输出的功能节点。充电器SYS端、保护FET、输出级之间的实际连接，以及同时充电/输出时的电流限制，仍需原理图审查与台架验证。第一版仅保留电池及常规母线电容；超级电容不计入任何时长收益。

能量边界与可复算模型

5. 从机械输入到USB源端

P_m 为曲柄轴机械输入，不是人体代谢功率。 η_m 为传动效率， η_g 为发电效率， η_r 为整流与输入调理效率。 P_g 为到达共享母线的功率； P_a 为控制、显示及计量的辅机功耗。 η_o 仅含输出级及机内路径， P_u 为产品USB-C源端口功率。外部线缆另计： $I=P_u/V$ 源， $P_{\text{受电}}=P_u-I^2R$ 回路； R 及电压须按实际配置测量。

$$P_g = P_m \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_r \quad (2)$$

$$P_{u,0} = \max(0, P_g - P_a) \cdot \eta_o \quad (3)$$

$P_{u,0}$ 是储能收支为零时的等效平均USB功率，不等于每一台电脑必定请求的功率。PD合同给出允许的电压、电流上限，设备实际取电可低于上限；实际输出不能随踏频任意改变电压。定义 Q 为母线收支：

$$Q = P_g - P_a - P_u / \eta_o \quad (4)$$

$$E(t+\Delta t) = \text{clip}[E(t) + \Phi(Q) \cdot \Delta t, E_{\min}, E_{\max}] \quad (5)$$

$$\Phi(Q) = \eta_c Q \ (Q \geq 0) ; \ \Phi(Q) = Q / \eta_d \ (Q < 0) \quad (6)$$

E 单位为Wh， Δt 单位为小时， η_c 与 η_d 为充、放电支路效率。在上限，盈余计作泄放/未接收能量；在下限，不能继续维持请求输出。底层记账函数限制可交付功率并记录缺供，以保持守恒；公开轨迹则在分析下限精确终止，不绘制下限之后的续供。实际控制还应在该数学边界之前重协商或停止。

$$t^* = (E_{\max} - E_{\min}) \cdot \eta_d / (P_u/\eta_o + P_a - P_g) \quad (7)$$

式(7)仅在恒定功率、分母为正、未提前降额时成立；小时乘60得到分钟。工作窗口以标称Wh等效定义，不将电芯电压线性换算成荷电状态。温度、老化、内阻及电芯截止电压可能使可用能量更小[9]。

守恒检查：机械输入能量 + 初始储能 = USB交付 + 辅机耗能 + 各级损耗 + 泄放能量 + 末态储能。 $\Delta t=1 \text{ min}$ 用于绘图； 1 s 用于闭式时长交叉核

参数设定与基准情景

6. 参数全部可见，证据类型分别标记

参数	基准设定	依据及含义
机械输入 P _m	17 / 25 / 40 W	17、25 W受[1]实验情景启发；40 W为额外扫参，不宣称适合办公持续使用。
踏频 n / 曲柄 r	50 rpm / 85 mm	本研究几何与控制假设；需人体适配。
传动 η _m / 发电 η _g	0.90 / 0.80	设计假设；不是供应商对本系统的效率保证。
输入调理 η _r / 输出 η _o	0.92 / 0.92	模型合并效率；η _o 不含外部线缆。均待测量。
充电 η _c / 放电 η _d	0.94 / 0.95	支路综合假设，避免把缓冲当作无损。
活动辅机 P _a	0.80 W	统一预算；本模型不预测长期待机。
电池标称值	12.8 V × 1.5 Ah	4S磷酸铁锂，19.2 Wh。非已选定电芯。
分析窗口	20%至90%标称能量	E _{min} =3.84 Wh，E _{max} =17.28 Wh，窗口13.44 Wh。
笔记本内部转换 η _L	0.93	用于第12节系统负载示例，非设备实测。

7. 25 W输入的逐级计算

25.00 → 22.50 → 18.00 → 16.56 W

(8)

依次对应曲柄轴、传动后机械端、发电机电端、整流与调理后的母线端。扣除0.80 W辅机后剩15.76 W；乘0.92输出效率，源端口得到14.4992 W。全路径到USB的比值为58.00%，不是对所有踏频都恒定的真实效率。

在不输出USB、储能未达上限的条件下，25 W脚踏30 min使储能增加 $(16.56-0.80) \times 0.94 \times 0.5=7.4072$ Wh。若之后停止脚踏、按15 W USB输出并计0.80 W辅机，这部分新增储能最终可在源端口交付约6.1711 Wh，对应24.68 min；不能直接把7.41 Wh全部交给电脑。

持续补电的能力边界

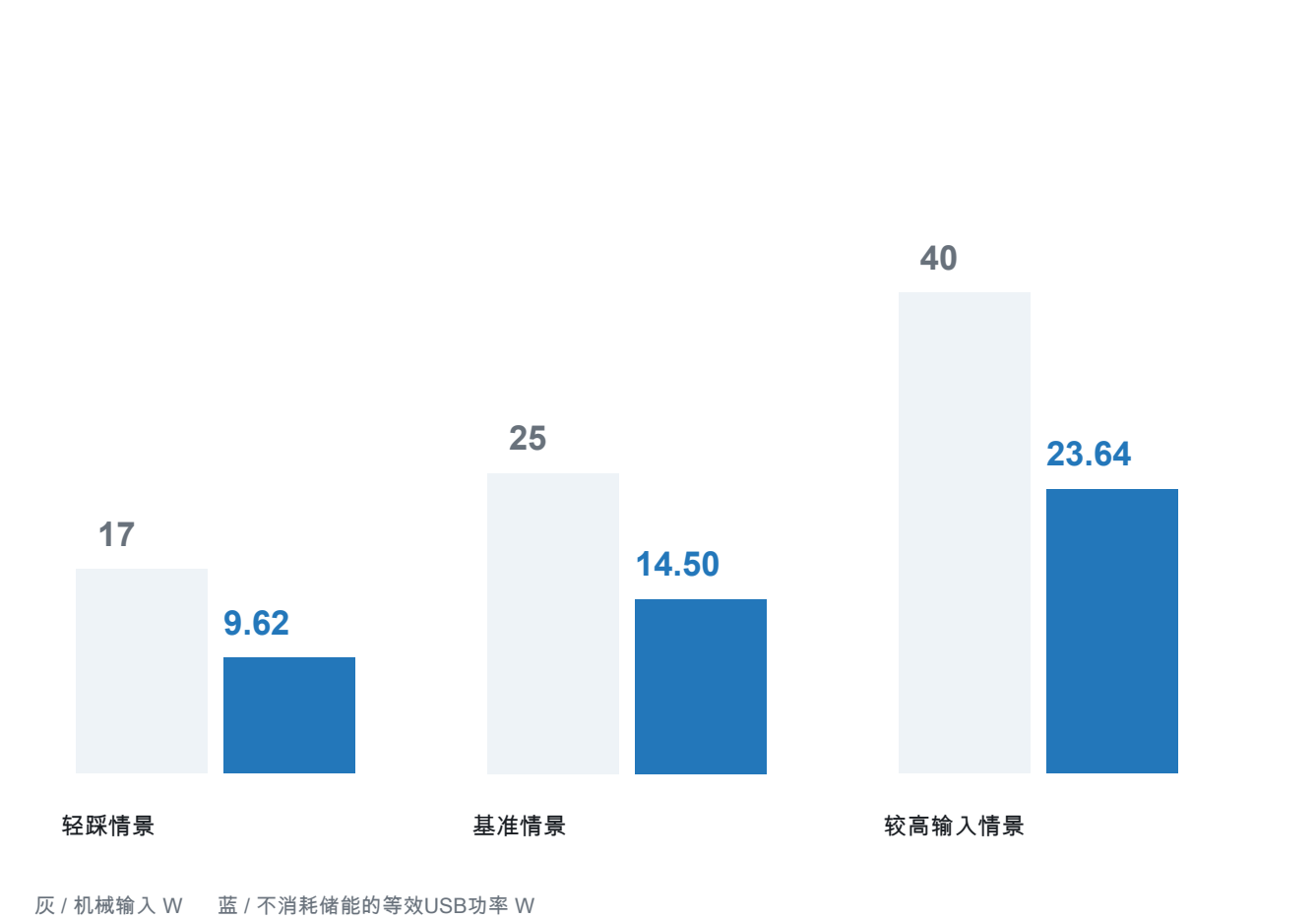


图4 同一组效率假设下的机械输入与不消耗储备的等效USB功率。各列不是设备测试值，也不是推荐运动强度。

8. “低强度”与“45 W持续输出”不能同时预设

17、25、40 W机械输入分别对应9.62、14.50、23.64 W等效USB功率。若要求45 W端口长期输出且储能不下降，反解所需机械输入为 $(45/0.92+0.80)/(0.90\times0.80\times0.92)=75.05$ W。该值尚未考虑效率随转速、电流和温度变化，因此也不是人体建议值。

文献[1]的96人受控实验比较17和25 W桌下踩踏，17 W条件的工效舒适度更高；[2]在不同任务与人群设置中观察到打字表现变化。这些研究支持“应研究轻踩与任务的关系”，不能支持踏启已安静、已舒适或不会影响工作的结论。

9. 为产品表达建立一致的能量单位

可以表达	需要同时出现的条件
14.5 W 等效持续补电	25 W机械输入，基准效率，储备不下降的平均能量条件。
45 W USB-C PD输出目标	硬件、温度、电池与协商均允许；输出差额来自储能。
30 min储能增加7.41 Wh	25 W输入，无USB负载，初始能量有足够充入空间。
应急续航	必须给出初始储能、实际负载和截止策略；不可只写一个分钟数。

缓冲储能与有限时长输出

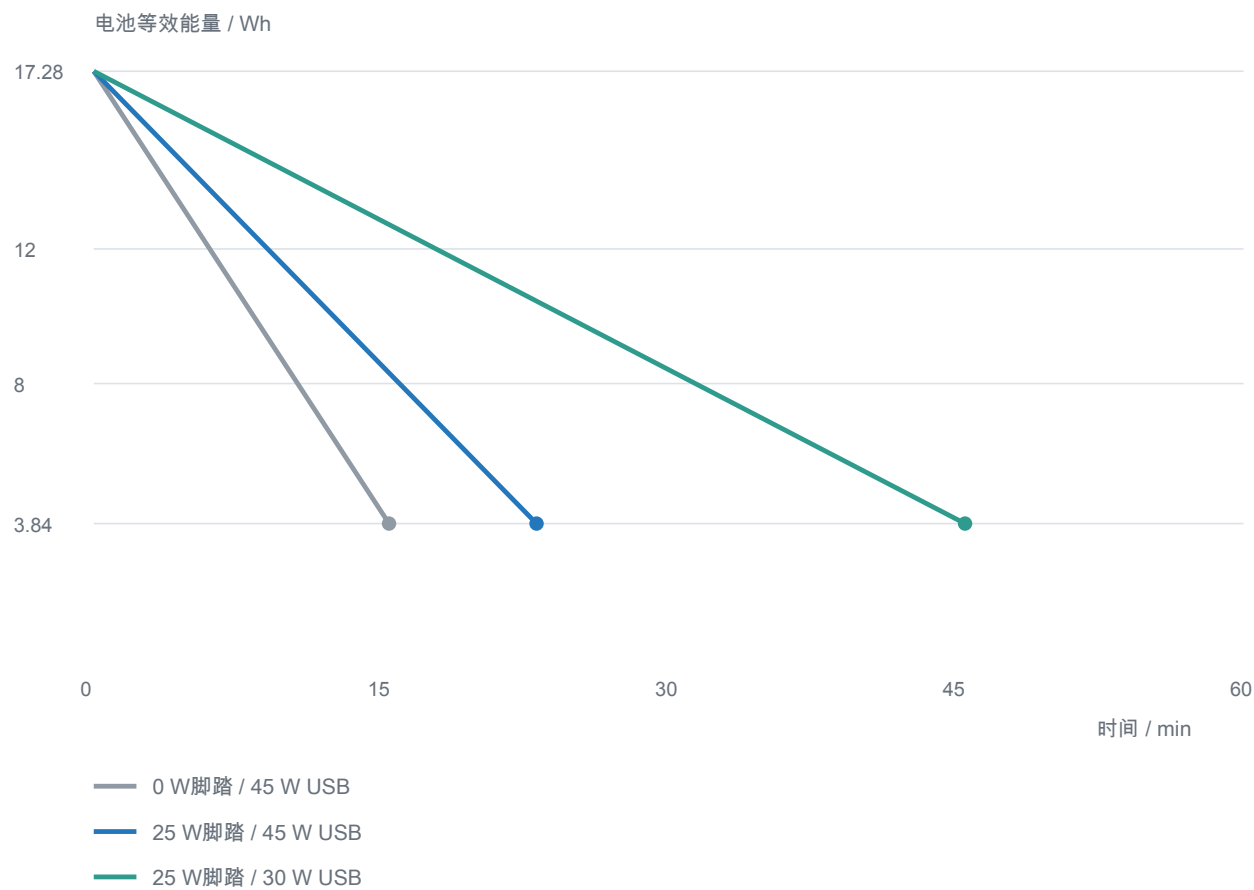


图5 从17.28 Wh起算，到3.84 Wh分析下限的确定性轨迹。圆点为精确计算终点；曲线在该处结束。端口实际退出应更早，未模拟重协商过程。

USB源端功率	停止脚踏	25 W机械输入	40 W机械输入
15 W	44.79 min	1407.34 min*	收支非负*
30 W	22.93 min	45.47 min	110.82 min*
45 W	15.41 min	23.11 min	33.00 min

*长时值仅显示定常模型趋近能量平衡的数学行为；不构成连续使用时长、人体耐力或电池寿命预测。实际控制应在到达下限前退出。

10. 45 W模式为什么需要能量门槛

无脚踏时，45 W输出在母线需48.91 W，加0.80 W辅机后，电池等效耗能为52.33 W。若要预留10 min输出，需可用储能约8.72 Wh；本研究设可用储能 $E - E_{min} \geq 10$ Wh门槛，即 $E \geq 13.84$ Wh；余量约1.28 Wh，仍待试验。25 W无USB负载从分析下限积累10 Wh需40.50 min，不代表深度放电冷启动。当前温度、低端电芯电压、电池电流或路径能力不足时，即使总Wh足够，也不能启用45 W。

敏感性与笔记本端的解释

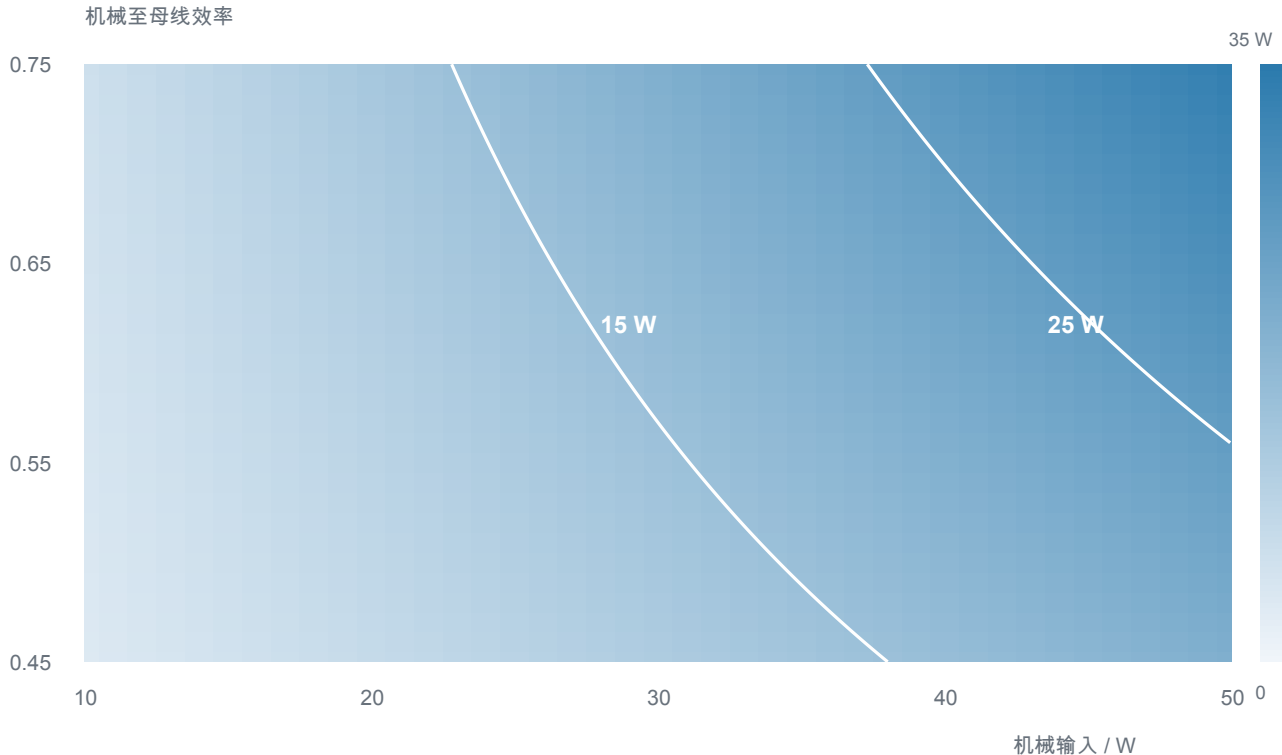


图6 机械输入10至50 W、机械至母线总效率0.45至0.75的1271点网格。颜色标尺为0至35 W，网格最高约33.76 W；白线为15/25 W等值线。不是概率图或置信区间。

11. 效率假设改变，结论应随之改变

25 W机械输入时，总效率0.45、0.55、0.6624、0.75分别对应9.61、11.91、14.50、16.51 W等效USB功率。在低功率区，0.80 W辅机占比增加；若发电机低速效率下降或整流压降占比上升，用固定效率得到的结果可能偏乐观。本文用确定性扫参暴露依赖性，不为效率分配未经证实的统计分布。

12. “补电”怎样影响工作时间

$$P_{\text{受电}} = P_u - (P_u/V_{\text{源}})^2 R_{\text{回路}}; P_{\text{贡献}} = \eta_L \cdot P_{\text{受电}} \quad (9)$$

以30 W内部负载、 $\eta_L=0.93$ 、20 V源端及假设回路电阻0.10 Ω 举例：14.4992 W端口功率经线缆后约14.4466 W，内部贡献约13.4354 W，覆盖44.78%。0.10 Ω 仅为演示值。45 W源端在20 V/2.25 A下末端约44.4938 W。实际取电受协议及电脑策略限制，不据此承诺续航倍数。

即使端口已成功协商45 W，也不意味着电脑持续取走45 W，更不意味着内置电池净充电45 W。验证时需同时记录PD合同、实际端口功率、笔记本系统负载及内置电池能量变化，避免把操作系统的“充电中”图标当作能量证据。

工业设计与可解释交互

13. 统一形态，给结构留出空间

外观采用石墨黑上盖、冷钛银肩部和黑色纹理踏板，蓝色细灯只表达状态。外包络目标500×400×240 mm，主轴中心高132 mm，曲柄半径85 mm，踏板厚18 mm。踏板最低下表面约38 mm、最高上表面约226 mm；底座厚24 mm时只得到14 mm几何余量，仍须检查脚跟、外壳及不同踏板倾角。渲染不承担尺寸图的作用。

桌下适配取决于座椅高度、前后距离、膝部轨迹、鞋型与桌下净高。不能用240 mm机身高宣称适合全部办公桌。短曲柄在同功率同踏频下增加脚力；85 mm所需等效切向力为170 mm的两倍。质量目标9 kg、地面摩擦系数假设0.6时，仅自重提供约52.97 N静摩擦；35 N水平扰动力有余量，而70 N会超过它。故需试验地面材料和椅轮止退附件，不能只靠增加配重宣称稳定。

14. 能量策略和阻力策略分开

状态	进入与行为	退出条件
缓充	无USB负载；限制输入转矩，将盈余充入电池。	达到上限后卸载或可控泄放，不突然锁脚。
应急输出	能量、温度、电流允许后协商合同；电池补足差额。	储能接近保留阈值，提前重协商较低能力。
受控降额	预算下降先通知协议层；在剩余能量内完成协商。	协商失败则按协议受控断开，不偷偷降低合同电压。
保护 / 停止	故障或用户停止；切断危险路径，脚踏保持可退出。	故障消除且满足恢复条件，再允许重新进入。

45 W目标配置包含5 V/3 A、9 V/3 A、15 V/3 A，并可提供20 V/2.25 A以研究笔记本兼容性；20 V并非45 W功率规则的必需档[5,10]。多档位只描述能力上限。显示建议分别呈现INPUT机械估计、USB实际交付和可用Wh，不能用一个“28 W”混指三种边界。

主动控制须限制转矩，接近零转速时不能按恒功率令转矩发散。180° 双曲柄仍有死点；电池稳电不等于踩踏平顺，须校核转矩波动和惯量。噪声与温升均待测；满储能、无负载且仍输入40 W时须处理40 W能量或卸载。

实验命题、失效条件与复现

15. 先写清楚什么结果会否定方案

命题 / 预设门槛	试验与记录	否定或返工条件
H1 基准能量可达到	驱动台50 rpm/25 W输入，扭矩转速计+各级功率分析；先稳态30 min，再重复5次。	USB储能中性功率低于13 W，或能量账本残差超过测量不确定度预算，重估效率/拓扑。
H2 缓冲能稳定端口	15/30/45 W电子负载；踏频0至75 rpm、负载跃迁、停踩；记录VBUS和CC协议。	无故重启、越出协商条件或保护反复振荡；不以平均电压掩盖瞬态。
H3 45 W可受控退出	不同能量、电芯电压、温度下，从10 Wh可用能量启动；观察10 min窗口与退出序列。	未达10 min即掉电，或重协商未完成就失压，调整门槛与路径。
H4 桌下动作可以适配	覆盖多种身高/鞋型与可调桌椅；先几何样机，再正式试验；记录碰撞、滑移和主观负担。	膝部碰桌、机身滑移、椅子后退或足部被束缚，修改结构后重测。
H5 声热与满储能可控	30 min/2 h升温；背景声、地面、1 m声压与频谱；满储能无负载持续输入。	超出最终电芯/元件限值、异常热区或突变制动力，重做散热/卸载。

16. 局限与下一阶段

固定效率忽略速度、电流、温度及电芯状态的耦合；几何筛查不等于详细CAD、疲劳分析或加工图。用户研究须区分轻踩是否可接受与应急输出是否值得付出体力。已有桌下运动研究不能替代踏启的人机试验；本研究也不宣称健康、减碳或静音效果。

复现材料含model.py、test_model.py、完整参数、5组轨迹CSV、1271点效率网格、参考文献和图像提示词。先运行python3 model.py，再运行python3 -m unittest test_model.py。12项自动检查覆盖守恒、能量边界、轨迹、网格、线缆损耗、轴载荷耦合及储能门槛；另以十进制独立算式复核主要数字。检查只验证代码与算式，不验证产品。

REFERENCES / REPRODUCIBILITY

参考文献与版本说明

- [1] Rovniak LS, Cho J, Freivalds A, et al.. Effects of Desk Pedaling Work Rate on Concurrent Work Performance among Physically Inactive Adults: A Randomized Experiment. 2023. Medicine & Science in Sports & Exercise, 55(1):20-31. DOI: 10.1249/MSS.0000000000003026.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35977110/>
- [2] Cho J, Freivalds A, Rovniak LS. Utilizing anthropometric data to improve the usability of desk bikes, and influence of desk bikes on reading and typing performance. 2017. Applied Ergonomics, 60:128-135. DOI: 10.1016/j.apergo.2016.11.003.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28166871/>
- [3] Kafader U / maxon. maxon Motors as Generators. 2024.
<https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360004496254-maxon-Motors-as-Generators>
- [4] Mitsuboshi Belting. Timing Belt Design Manual - Design flow. n.d..
https://global.mitsuboshi.com/assetFiles/timing_belt_design_manual_en.pdf
- [5] USB Implementers Forum. USB Charger (USB Power Delivery). n.d..
<https://www.usb.org/usb-charger-pd>
- [6] Texas Instruments. BQ25798 - 1-4-cell buck-boost battery charger with power path. 2026.
<https://www.ti.com/product/BQ25798>
- [7] Texas Instruments. TPS55288 - I2C programmable buck-boost converter. n.d..
<https://www.ti.com/product/TPS55288>
- [8] Texas Instruments. TPS25751 - USB Type-C and USB PD controller. n.d..
<https://www.ti.com/product/TPS25751>
- [9] Rook J / Texas Instruments. LiFePO4 Design Considerations. 2023.
<https://www.ti.com/lit/pdf/SLUAAR1>
- [10] Waters D / Texas Instruments. What to Gain in USB PD 3.0?. 2016; updated 2021.
<https://www.ti.com/document-viewer/lit/html/SSZTB41/GUID-05C0532B-243D-421B-97AC-822827977896>

版本与材料说明

v1.2 / 科学性复核，2026.10.22。修正源端与受电端功率混用、300 N载荷下扭矩漏算；完整复核见配套审核报告。来源访问日期同版本日期。文献[1,2]使用作者论文的PubMed摘要；技术资料使用制造商和USB-IF页面。来源中的效率、认证与实验结论均不移植为踏启性能。产品及模块拆解图由内置imagegen生成；精确传动由图2和参数表定义，不从渲染反推带轮比例。此稿为理论设计研究，尚无作者署名确认、学术同行评审或样机实证。