

电池正极工件自动称重分选设备的研制报告

苏州仅一测控技术有限公司 龚小林

摘要： 本文详细介绍了对纽扣电池的石墨正极工件进行全自动高精度称重分选设备的研制过程。在探索试制过程中，工程技术人员对于动作可靠性设计、称重精度稳定性保障、传感器饱和变形测试、系统动态响应分析、零点恢复时限评估、振动消除工艺试验等等技术原理建立了深刻认识，形成自主专有的技术工艺体系，为今后研发此类自动化称重设备积累了宝贵经验。该设备成功投入运行后，终于实现了完全自动化流水线生产，显著提高生产效率，替代原有两个人工分选班组的 16 名操作工，改善了产品质量管控水平，带来可观的经济效益。

关键词： 自动校准， 零点恢复， 动态响应， 重复称重误差， 静态真值

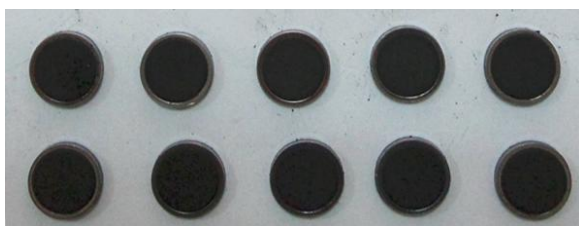
一、任务的提出：

单颗锂离子电池的电能容量是很有限的，需要把很多个单颗锂离子电池串联并联起来构成电池组，才能满足动力电池和储能电池对于“高电压、大容量”指标的追求，可以应用在电动汽车和移动通讯等设备上。而参与串联并联的每一颗锂离子电池，其性能指标都必须具有高度一致性，这就要求在单颗锂离子电池生产过程中，它的石墨正极工件的重量要尽可能一致。

石墨正极工件成型机（俗称打饼机）用一组模具来压制正极饼料，它能保证所压制成型的正极工件几何尺寸完全一致，但是由于粉末原料的密度不均匀和压力微小变化，影响到它无法保证工件重量的一致性。

所以，从成型机流出来的正极工件需要进行称重分选，把重量在某个范围内的工件归为一类。国内某著名品牌电池生产企业一直采用人工称重分选方法，无法实现全自动流水线生产，而且人工称重分选工作枯燥乏味，很容易出现人为差错，急需要研发全自动高精度称重分选设备来替代人工作业，我公司于 2015 年 7 月份应邀承接了这个项目的研制任务。

单颗石墨正极工件的直径为 $\Phi 16 \sim 22\text{mm}$ ，厚度为 $2 \sim 5\text{mm}$ ，以直径 20mm 厚度 3.2mm 规格型号的正极工件为例，其标称重量为 2.700g，实际产品重量范围在 2.630g \sim 2.770g 之间，产品形态概貌如下照片：



纽扣电池石墨正极工件的照片

二、客户的要求：

1. 把上述正极工件按重量分成 3 类，即：

重量范围 A 类：2.651g \sim 2.700g；

重量范围 B 类：2.701g \sim 2.750g；

重量范围 C 类： $\leq 2.650\text{g}$ 和 $\geq 2.751\text{g}$ 。

2. 为了降低分选误判概率，设备的重复称重误差 $\leq \pm 0.005\text{g}$ ，并且在无人值守连续运转条件下称重精度长期稳定，现场会有巡查员不定时抽检，与天平称量结果进行比对。

关于“重复称重误差”的定义和检验方法：相同规格同一个重量值的一批物件连续 N 次 ($N \geq 1000$) 通过设备，称量出 N 个重量值，这 N 个数值的平均值应该等于该批物件在天平上称量出的静态真值，而它们的最大值和最小值与平均值之差的绝对值中，最大的数值就是设备的重

复称重误差。

3. 由于成型机的产出速度在 90 -- 100 件/分钟之间，要求全自动称重分选设备的处理速度长期稳定地达到 100 件/分钟。

4. 工件在传输时无磕碰，无划伤，整个称重分选过程中工件重量损失 $\leq 0.005g$ 。

三、分析及对策：

1. 对于称重精度及精度稳定性的考虑

设备是用于全自动在线称重分选的动态称重机器，而天平是实验室人工操作的静态称量仪器，要把设备的动态称重结果与天平称量的静态真值进行比对，从而检验判定设备的称重精度，那么，设备在自动快速加卸载工况下的称重过程必须是高速度高精度的，秤台在非自动加卸载条件下的称重精度应该达到天平的称量精度，这样才能具备比对的基础，这里所说的称量精度主要是指准确度、重复误差和读数稳定性。

这就意味着，需要采用与电子天平一样的称重方法，即：秤台是静止的，传感器及其安装底座是坚固不动的，并且要尽量减少机械震动和空气流动的干扰。被测工件由辅助机构搬运放置到秤台上，称重结束后，再由辅助机构搬运离开秤台，等待秤台恢复到零点后才可以开始下一次放置。但是，考虑到动态称重任务的效率要求，加载卸载过程是瞬间完成的，被测物件在秤台上停留的时间是短暂的，物件离开秤台后的零点恢复时间更是短暂的。所以，不能采用与电子天平一样的传感器性能考核确定方法，也不能采用电子天平那样的静态测量技术套路。

天平的称量精度可以用标准砝码随时校准来得到保证，它的零点变化、温度漂移、时间漂移等因素都可以通过校准而消除掉，甚至可以在每次称量之前先作校准，所以认为它的精度是稳定的。设备在无人看护条件下长期连续工作，它的称重精度如何保证稳定呢？这就需要引入自动校准技术：给设备内置一组特定规格形状的砝码，每当秤台连续称重一段时间或一定数量的工件时，系统就创造条件让秤台空闲 6 秒钟时间，机构完成一次自动加卸载砝码的过程，把秤台校准一次，从而消除温漂时漂和零点迁移等因素带来的影响。

设计对策 1

考虑到制造维护成本和现场应用环境因素，最终决定，采用我公司自产的电阻应变式称重传感器 SP2/300g 和高精度动态测量模块 R23L 作为称重系统的核心部件。

SP2/300g 称重传感器的量程为 300g，输出灵敏度 1.4mV/V，固有频率 50Hz，综合精度 C4 等级。把秤台自重限制在 40g 以内，秤的量程设定为 20g。这样的话，对于 2.700g 左右的有效称量来说，传感器始终工作在量程的 15% 以内，这是典型的“大量程，小称量”应用，好处是：①加载颤抖幅度小，饱和变形时间短从而输出趋向稳定的时间短，所以物件在秤台上停留的时间可以缩短；②卸载过冲幅度小且谐波震荡次数少，零点恢复迅速，从而缩短下次加载前的归零等待时间；③在连续工作条件下，显著延长传感器的使用寿命，降低维护成本。缺点是：有效称量输出信号小，容易被噪声淹没掉，这对后续测量仪表带来了严峻挑战。

高精度动态测量模块 R23L 的测量输出速度为 250 次/秒，称重分度值 0.001g，温度漂移 5ppm/°C 以内，时间漂移 50ppm/年以内。采用交流激励调理和数字卷合技术，其内部模数转换速度 1000Hz，转换数码分辨率 ± 27 bits。这样的转换速度与传感器固有频率形成同步匹配效应，有利于及时跟随饱和变形状态，为分析动态响应过程提供必要条件；这样的转换数码分辨率满足了传感器在全量程范围内的读数稳定性，为选择“大量程，小称量”的应用方案提供数码空间支持。交流激励调理使得测量电路的零点永远稳定，在连续测量条件下不用担心参考基准的漂移，只需要关注传感器零点迁移即可。环形数字滤波器对于阶跃信号的响应时间小于 140ms，这对传感器固有频率附近的机械震荡谐波产生很好的抑制效果。

称重传感器 SP2/300g 与测量模块 R23L 连接起来，组成高精度动态称重系统。对于 5g 左右物件瞬间加载后，只需要 0.75 秒时间就能测量出稳定的终值，瞬间卸载后，仅需要 0.65 秒时间就能趋向稳定的零点。

这样的称重性能指标，可以支持每 3 秒钟作为一个称重分选周期，实现“搬运 -- 放置 --

在台稳定 -- 取走 -- 分类投放 -- 零点恢复”连续循环的动作过程。由于石墨正极工件表面粘有粉尘杂物，每个称重周期后秤台上会残留不确定重量的粉尘，所以在每次放置工件前都要测量当前皮重，以便消除残留粉尘对称重精度的影响。

2. 对于称重分选效率的规划

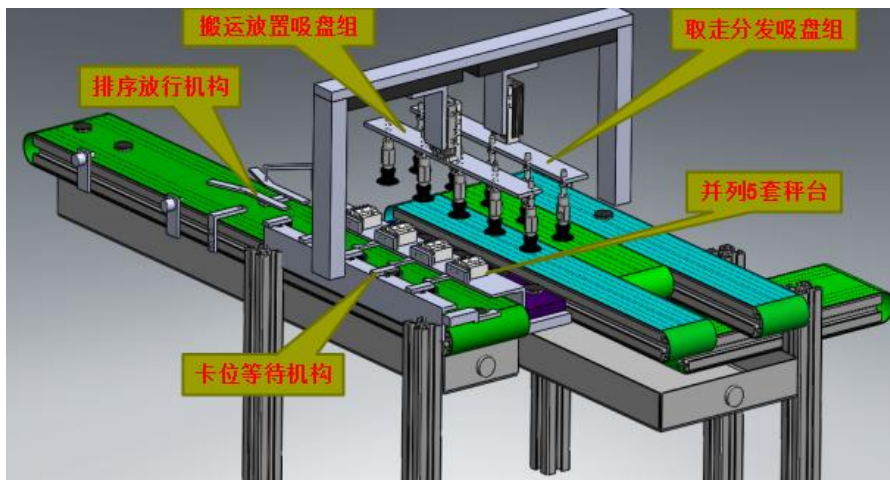
要求设备长期稳定地以 100 件/分钟速度处理工件，如果一个秤台每 3 秒钟完成一次称重分选动作周期，那么，就需要把 5 套独立的秤台机构并列起来同步工作。

称重稳定和零点恢复过程必须占用 1.4 秒时间，剩下的 1.6 秒时间留给辅助机构完成搬运 -- 放置 -- 取走 -- 分类投放这些动作，这点时间显然是不够的，那就必须采用时间重叠法设计思路，比如，把搬运过程与取走过程的时间段局部重合，把放置过程与分类投放过程的时间段局部重合，而设备前端的排序放行动作过程和卡位等待动作过程又与搬运取走动作过程时间段重合，这样环环相扣，最大限度地节省时间。

设计对策 2

设备整体构造设想应该如下图所示。工件在输送过程中不能有磕碰划伤，整个称重分选过程中工件的重量损失要 $\leq 0.005g$ ，能够采用的最好传输方式就是吸盘搬运法。搬运吸盘组从卡位上吸住 -- 提起 -- 搬运 -- 压低 -- 放置到秤台，称重结束后，取走吸盘组从秤台上吸住 -- 提起 -- 取走 -- 分类投放，整个过程中对工件无磕碰划伤，无磨损。

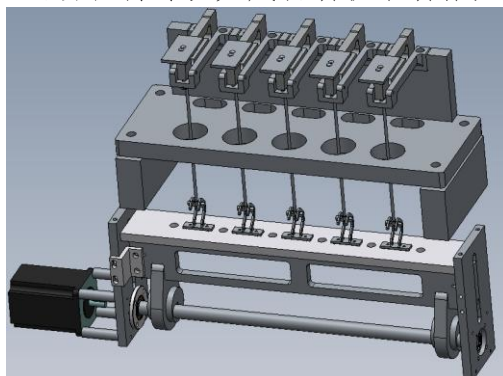
排序放行机构由一条导槽和两道放行闸门组成，把一字排列的工件等间隔放行出来，流到卡位机构时，被依序推送到各自的卡位上，当集齐 5 个工件时，等待被吸走。这个过程仅仅在推送到卡位时会产生很微小的磨损，但这是发生在称重之前的重量损失，可以忽略不记。



设备整体结构设想图

3. 如何实现自动校准

5 套独立的秤台机构并列起来，一字排列布局，间距均等，传感器上方安装不锈钢秤台，下方是倒梯形挂杆，挂载对应的砝码。5 只砝码放置在托架上，由电机凸轮机构带动升降运动，使砝码稳定地挂载卸载，这套机构可以完成自动校准动作，结构如下图所示：



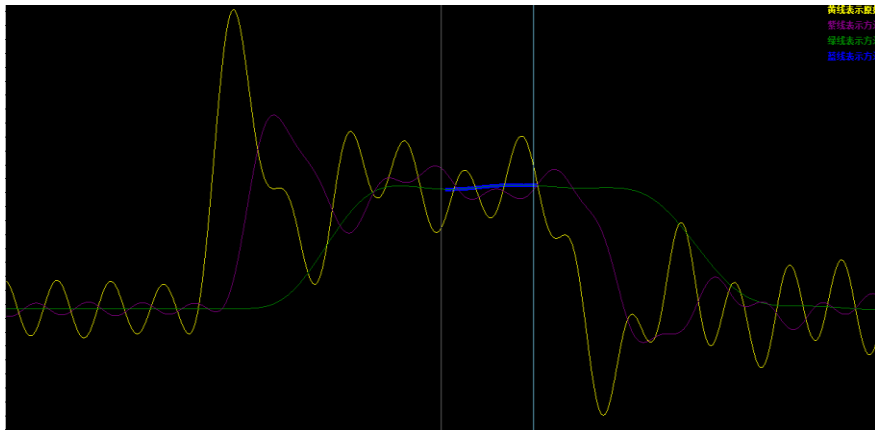
自动校准机构设想图

传感器和测量模块都存在温度漂移和时间漂移，并且随着称重动作过程的延续，传感器零点还会发生迁移现象，所以，每当工作一段时间后，需要对称重系统进行砝码校准。设备前端的放行闸门暂时停止工件放行，给秤台创造 6 秒钟空闲时间，启动校准电机下行，挂载砝码，等待传感器输出稳定时确认校准重量，然后校准电机上行，砝码卸载，传感器归零，自动校准过程完成，把上一次校准以来的系统漂移变化都消除了。

4. 动态响应分析

物体在受力过程中，力的施加或撤销动作比较迅速，一次施加和撤销过程基本上在 50 -- 300mS 之内完成，对这种作用力周期里各个时刻力值变化情况进行描述，就属于动态应力测量范畴。测量模块 R23L 对传感器 SP2/300g 施加 5V/375Hz 的交流激励，接收传感器输出的微弱混合信号，进行模拟调理、数字化分离、动态补偿、智能校准等处理过程，最终还原出逼真而实时的重量状态数据。

下图展示设备在连续工作状态下，某个秤台某一次快速加载卸载工件过程中称重数据的变化情况。黄色曲线是传感器输出的原始信号，可以看到加载时有激烈的过冲震荡，卸载时回冲幅度小，谐波分量也少；紫色曲线是数字化分离后的计算数据，震荡过程被部分剥离掉了，显露出趋向于稳定的态势；绿色曲线是动态抽样补偿后的计算数据，显示传感器在饱和和变形后能够迅速稳定下来；高亮蓝色线段是本次称重结果数据，变化已经很小了。



动态响应分析图

四、设备试运行：

经历了近 8 个月的设计制造修改，设备终于定型调试完毕，又经过 3 个月连续运行测试，验证了设备运行顺畅可靠，各项功能都正常，称重精度和分选速度都达到了预期指标要求。

下图是设备在客户现场试运行的视频截图，可以看到搬运吸盘组正准备向秤台放置工件，取走吸盘组正在向重量范围 B 类皮带投放工件，此时已经有两颗工件被推送到对应卡位上。



设备运行的视频截图

五、测试验收记录：

1. 精度测试过程

制作 15 个铝质的仿制替代样品，编号 1 至 15，在天平上称量出每个样品的静态真值，按顺序依次放进设备进行测试，每一轮产生 15 个测量数据，自动记录到 U 盘，这样连续重复进行 10 轮为一个测试周期。我们在每天里的不同时段共作 50 个测试周期，持续测试了 3 个月，重复称重误差都在 0.005g 以内。下图是某个测试周期的统计数据表格：

自动称重设备称重精度验证数据-1															
	1重量	2重量	3重量	4重量	5重量	6重量	7重量	8重量	9重量	10重量	11重量	12重量	13重量	14重量	15重量
标准真值	2.735	2.742	2.731	2.735	2.743	2.736	2.730	2.742	2.735	2.731	2.732	2.729	2.733	2.740	2.736
一次验证数	2.736	2.743	2.733	2.737	2.742	2.738	2.734	2.742	2.736	2.731	2.735	2.732	2.733	2.742	2.737
偏差	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	0.001	-0.002	-0.004	0.000	-0.001	0.000	-0.003	-0.003	0.000	-0.002	-0.001
二次验证数	2.738	2.745	2.732	2.735	2.744	2.738	2.734	2.744	2.735	2.732	2.736	2.733	2.736	2.742	2.737
偏差	-0.003	-0.003	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	-0.004	-0.002	0.000	-0.001	-0.004	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001
三次验证数	2.737	2.743	2.73	2.736	2.743	2.741	2.735	2.744	2.738	2.732	2.735	2.733	2.735	2.742	2.736
偏差	-0.002	-0.001	0.001	-0.001	0.000	-0.005	-0.005	-0.002	-0.003	-0.001	-0.003	-0.004	-0.002	-0.002	0.000
四次验证数	2.738	2.745	2.733	2.735	2.745	2.738	2.733	2.742	2.736	2.729	2.736	2.734	2.735	2.742	2.736
偏差	-0.003	-0.003	-0.002	0.000	-0.002	-0.002	-0.003	0.000	-0.001	0.002	-0.004	-0.005	-0.002	-0.002	0.000
五次验证数	2.736	2.742	2.731	2.734	2.742	2.739	2.733	2.741	2.736	2.73	2.735	2.732	2.734	2.741	2.735
偏差	-0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	-0.003	-0.003	0.001	-0.001	0.001	-0.003	-0.003	-0.001	-0.001	0.001
六次验证数	2.736	2.743	2.732	2.735	2.742	2.739	2.734	2.745	2.738	2.73	2.735	2.733	2.734	2.741	2.736
偏差	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.001	-0.003	-0.004	-0.003	-0.003	0.001	-0.003	-0.004	-0.001	-0.001	0.000
七次验证数	2.736	2.742	2.73	2.733	2.741	2.741	2.733	2.745	2.737	2.73	2.737	2.732	2.733	2.74	2.733
偏差	-0.001	0.000	0.001	0.002	0.002	-0.005	-0.003	-0.003	-0.002	0.001	-0.005	-0.003	0.000	0.000	0.003
八次验证数	2.738	2.742	2.732	2.735	2.742	2.738	2.733	2.743	2.736	2.73	2.736	2.733	2.734	2.741	2.733
偏差	-0.003	0.000	-0.001	0.000	0.001	-0.002	-0.003	-0.001	-0.001	0.001	-0.004	-0.004	-0.001	-0.001	0.003
九次验证数	2.737	2.743	2.73	2.735	2.74	2.738	2.733	2.741	2.734	2.73	2.735	2.733	2.734	2.742	2.736
偏差	-0.002	-0.001	0.001	0.000	0.003	-0.002	-0.003	0.001	0.001	0.001	-0.003	-0.004	-0.001	-0.002	0.000
十次验证数	2.738	2.743	2.731	2.735	2.741	2.74	2.734	2.743	2.737	2.73	2.735	2.73	2.733	2.74	2.734
偏差	-0.003	-0.001	0.000	0.000	0.002	-0.004	-0.004	-0.001	-0.002	0.001	-0.003	-0.001	0.000	0.000	0.002
测试数量	150	0.000	0.000												
误判数															
误判率															

重复误差测试统计表

2. 重量损失情况测试过程

任意拿出 5 个工件作为一组，先在天平上称量出每个工件的“原始重量”，按顺序放入设备作测试，记录设备显示的“测试数据”，然后再把每个工件放到天平上称量出“过后重量”，把每个工件的这三种数据记录到表格里，每 5 组工件测试数据汇总成一张表格。我们在每天里的不同时段共测试 5 张表格，持续测试了 3 个月，重量损失都在 0.005g 以内。下图是某次失重测试的数据表格：

失重情况测试对比						
组数	数据含义	1重量	2重量	3重量	4重量	5重量
1	原始重量	2.668	2.665	2.738	2.724	2.712
	测试数据	2.668	2.666	2.736	2.722	2.710
	过后重量	2.667	2.663	2.735	2.721	2.708
	失重	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004
2	原始重量	2.725	2.734	2.671	2.740	2.692
	测试数据	2.725	2.733	2.671	2.739	2.691
	过后重量	2.724	2.734	2.671	2.740	2.691
	失重	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
3	原始重量	2.723	2.703	2.665	2.732	2.715
	测试数据	2.721	2.704	2.662	2.731	2.715
	过后重量	2.723	2.703	2.665	2.731	2.715
	失重	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
4	原始重量	2.718	2.682	2.696	2.718	2.737
	测试数据	2.716	2.679	2.696	2.716	2.738
	过后重量	2.717	2.681	2.696	2.717	2.737
	失重	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
5	原始重量	2.762	2.675	2.672	2.720	2.724
	测试数据	2.760	2.673	2.670	2.717	2.724
	过后重量	2.761	2.675	2.672	2.720	2.724
	失重	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

结论：物料流出机器后的重量比进入机器前最多减少4mg。

失重情况统计数据表

六、结束语：

设备验收合格交付使用后，到目前已经连续工作近 9 个月时间，每天运行时间都在 20 小时以上。客户长期考核下来，认为设备运行顺畅可靠，称重精度达到预定标准，并且精度长期稳定可信，设备连续工作时处理速度与成型机的产出速度完全匹配。

谈到客户对这个项目的评价时，我耳边响起客户的一位副总经理的诙谐赞美：“看来火车确实不是推的，牛皮确实不是吹的。数据证明了你们的实力，实践体现出你们的价值！”

其实，在接手这个研制任务之前，我公司已经出品过其他类似的自动化高精度在线检重设备，客户都是国内五百强企业和世界著名品牌企业，如首钢磁材、日立化成等公司。

参考文献：

- [1] 将庆，沈小倩，蔡晋辉等，动态称重中一种新型自适应噪声抵消处理方法[J]，仪器仪表学报，2009，30（6）
- [2] 柴丽娟，那文波，李宁等，小波分析在微重量动态称重中的应用研究[J]，工业控制计算机，2009,22（10）
- [3] 韩宁，郑启宁，小波阈值去噪算法在信号处理中的应用与优化[J]，战术导弹技术，1009-1300（2011）03-0074-03

作者简介：

龚小林，男，汉族，1967 年出生，江苏省苏州市人，高级工程师，计算机专业硕士学位，从事应力测量产品和工程技术研发，现任职苏州仅一测控技术有限公司首席工程师，总经理。