

产学研融合

# 开源硬件工程初探： 手机连接线的工艺控制论

李振华<sup>1</sup> 仇嘉星<sup>1</sup> 林 灏<sup>1</sup>  
宫良一<sup>1</sup> 张 祥<sup>2</sup>

<sup>1</sup>清华大学

<sup>2</sup>江苏双马线缆科技有限公司

关键词：硬件工程开源 手机连接线 数据通信 工艺流程 控制论

## 引言：当开源遇见硬件工程

计算机软件和功能与性能日益强大，其组件构成与研发过程也愈发复杂，导致计算机软硬件的学习曲线越来越陡峭、知识在民间的传递越来越困难，科学技术被少数派隔离垄断的风险越来越高。

对抗这一危险趋势的努力首先来自软件领域，以1983年理查德·斯托曼（Richard Stallman）发起GNU计划为显著标志。GNU这个名称很有意思，它是“GNU’s Not UNIX!”的递归首字母缩写，专门针对当时已被美国电话电报公司（AT&T）等少数派所垄断的UNIX操作系统。近四十年来，随着开源软件（以Linux为代表）以及开源软件工程（受益于Github类代码托管平台）的思想不断深入人心，复杂软件及其研发过程所带来的认知困难被有效抵消，甚至四岁小孩也能对Linux操作系统作出贡献<sup>[1]</sup>。

与软件相反，硬件受制于商业保护普遍、迭代周期长以及实现成本高等一系列现实因素，其学习门槛通常对于一些专业的计算机研究者都较高。实际上，在计算机产业发展的初期，几乎所有的硬件都是开源的，包括显示器、打印机甚至苹果电脑，因为它们的整个设计原理图都是公开的，稍微专业一点的用户就能看懂。但好景不长，技术壁垒、专利版权、商

业保护将这一思想完全封印，直到2005年在意大利Arduin酒吧发起的Arduino计划<sup>[2]</sup>，才使得开源硬件的思想起死回生，但至今也仅是星星之火。

相比开源软件，开源硬件工程的实施难度更大，因为它涉及到硬件研发制造的每一个环节和步骤，所以至今未见任何代表性的计划或平台出现。尽管如此，我们依然坚定地认为：硬件工程作为人类技术、知识与智慧的重要构成部分，无论多么纷繁复杂，都应该被更多的人认知，值得被传承。

## 契机：手机连接线硬件工程的探索机遇

开源硬件工程的探索要从哪里开始？首先，它不能太冷僻，最好是我们生活中常见的硬件设备。其次，它不能太复杂，技术学习、知识传承的第一要求是易于理解。同时，它造价不能太高，因为我们探索的过程往往涉及对它的拆解甚至破坏。最后，也是最难的一条，需要有一家公司向我们完整开放其硬件生产线，如果有工业专家能够现场讲解就更加理想了。

上述四条要求加到一起，看上去十分苛刻、希望渺茫，但“踏破铁鞋无觅处，得来全不费工夫”。2021年的五一假期，我（本文第一作者）回到江苏

老家，在小学同学聚会上遇见具备神奇经历的张祥同学，他虽然只有高中毕业的学历，但已成为硬件技术专家及企业家，尤其是他主营的江苏双马线缆科技有限公司<sup>[3]</sup>，年产手机连接线接近3000万根，是富士康（苹果公司的代工厂商）、小米、华为等多家主流手机制造企业的服务供货商。

虽然这些年前前后后买过几十根手机连接线，但我从来都不清楚（实际上也没有什么机会搞清楚）其背后的研发过程和制造原理。同时，作为一名有着16年学术经历的网络通信研究者，虽然每天都会看见和使用诸多线缆，但我（居然）从来没有思考过这些线缆有什么值得研究的地方。于是，这次聚会的绝大多数时间就成为了我的提问时间，好在张祥娓娓道来、不厌其烦，俨然为我打开了科研的一扇新门。

不知不觉中，上述“Q&A”环节就进行到了夜里11点，也到了我们同学聚会散场的时候。张祥感受到了我浓厚的兴趣和求知的欲望，邀请我夜游双马线缆公司的生产车间，我自是欣然前往。生产车间位于阜宁县三灶镇工业园区，原以为此刻应该大门紧闭、黑灯瞎火的车间，下了车眼前却是灯火通明。于是，我的手机连接线硬件工程探索之行正式开始。

## 宏观：金属、塑料、权衡优化和统筹方法

进入年产3000万根手机连接线的生产车间，首先映入眼帘的是各种形状和颜色的金属和塑料：圆柱形、丝状、块状和液态，红色（铜）、银色（锡）和白色（聚氯乙烯（PVC））。整个硬件工程的起点是圆柱形的粗铜丝，专业名称是“原铜杆”，直径大约3毫米。原铜杆被多台机器像拉面一样越拉越细，这个被称为“拉丝”的过程最终要将粗铜丝拉到80微米粗细。拉到足够细的铜丝会被“退火”、“镀锡”和“封塑”，其作用分别是提升柔韧性、抗氧化和绝缘防磨损，这一来一去，物理、化学、机械学科知识都用上了。

同样材质的金属丝，越细通常越软，也越容易被拉断，那么这个80微米的直径是如何确定的？原来

一根典型的手机连接线需要兼具充电和数据传输两项功能，其中充电速度主要取决于铜丝的横截面积，数据传输速度主要取决于铜丝的外表面积。所以对于同样质量的原铜杆，拉丝粗细并不影响充电效率，但拉得越细则数据传输速度越高，同时消耗的镀锡和封塑也越多。总结起来，拉丝的粗细需要在数据传输速度和生产成本之间权衡优化，目前采用的80微米是工业界长期以来形成的比较接近最优的权衡选择。

我们夜游的生产车间分为上下两层。上面提及的各项工艺过程发生在下层，主要生产对数据传输速度要求不高的连接线，比如USB 2.0和视频图形阵列接口（VGA）。如果要求高速数据传输，比如USB 3.0和高清多媒体接口（HDMI），则需要更高水平的工艺过程，主要包括“发泡挤塑绝缘”、“铝箔屏蔽”和“编织屏蔽”，而这些都发生在车间上层。其中“发泡挤塑”和前面提到的“封塑”虽然功能类似，所用的原材料都是PVC塑料，但前者的工艺要求比后者高很多，特别是铜丝的电容值要控制在 $91 \pm 5$ 皮法。此外，“铝箔屏蔽”和“编织屏蔽”都是为了更好地绝缘抗干扰，数据率越高、连接线越长则要求越高。

宏观理解了手机连接线生产制造的十几道工艺流程后，时间已是深夜，但还有一部分工人继续奋战在流水线上。于是我的问题又来了：夜班工人需要支付额外的加班费，订单的甲方似乎也没有催促尽早交货，为什么生产线需要7×24小时不停工？张祥给我的答案是：流水线上每台机器都需要预热时间，短到几十分钟，长到十几个小时，只有预热完成，机器才能进入稳定工作状态，性能才有保障。因此，工厂需要根据订单、工人、机器以及季节（比如每年夏天农忙时节、很多工人都需要请假回家收割庄稼）等各种情况，提前实施统筹方法并制定工作计划，从而在保证订单按期交货的前提下，将生产成本降到最低。

## 深入：从工程控制论的角度再次实地考察

五一假期过后我回到学校，在组会上和学生

分享了手机连接线硬件工程的实地探索经历与感受。虽然我的研究组主要致力于计算机软件,很少钻研硬件,但大多数同学依然表现出极高的兴趣,提了很多问题,其中很大一部分我都回答不上,说明五一期间的考察还不够细致深入。因此,我再次和张祥联系,终于在一个多月后对江苏双马线缆科技有限公司进行了第二次考察。我们一行三人带着深度科研的目标,准备以“打破砂锅问到底”的态度更全面地理解手机连接线整个生产制造流程的方方面面。

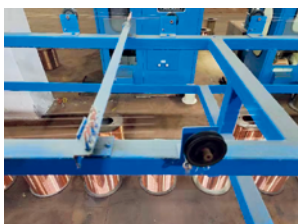
我们花了一整天时间,既去了前文考察过的第一个生产车间,又考察了位于阜宁县城的第二个生

产车间。这一天里,除了张祥全程陪同讲解,双马线缆公司的多名工程师也为我们阐述和展示了更多细节。通过此次考察,我们形成了比较全面、微观和深入的认知。首先,手机连接线的生产制造并非我上次所理解的十几道工艺流程,而是有如下 27 道工艺流程。

原铜杆 → (1) 中拉单丝 → (2) 小拉单丝 → (3) 微拉单丝 → (4) 单丝退火 → (5) 单丝镀锡 → (6) 多股束丝 → (7) 发泡挤塑绝缘 → (8) 高压绝缘测试 → (9) 对绞 → (10) 铝箔屏蔽 → (11) 成缆绞合 → (12) 编织屏蔽 → (13) 外被挤出 →



原铜杆



(1) (2) (3) 拉丝



(1) (2) (3) 拉丝



(4) 单丝退火



(5) 单丝镀锡



(6) (9) (11) 束丝绞丝



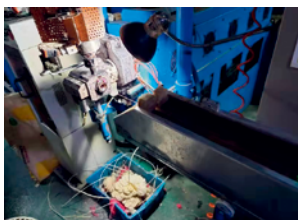
(6) (9) (11) 束丝绞丝



(6) (9) (11) 束丝绞丝



(6) (9) (11) 束丝绞丝



(7) 发泡挤塑绝缘



(7) 发泡挤塑绝缘(测量电容)



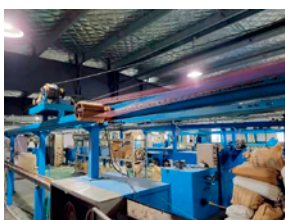
(7) 发泡挤塑绝缘



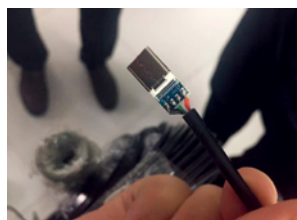
(8) 高压绝缘测试



(10) 铝箔屏蔽



(11) 成缆绞合



(19) 焊接连接器



(14) 火花绝缘测试 → (15) 裁线 → (16) 剥外被 → (17) 两端线材理线 → (18) 剥芯线 → (19) 焊接连接器 → (20) 组装屏蔽罩 → (21) 电气测试 1 → (22) 注塑内模 → (23) 注塑外模 → (24) 电气测试 2 → (25) 外观检验 → (26) 出厂测试 → (27) 成品包装

此外,更重要的发现是:除了我上次了解到的相对直观的权衡优化和统筹方法,在手机连接线的硬件工程中多处隐藏着更具科学意义的控制论思想<sup>[4]</sup>。这里的控制论思想是朴素的、经验性的,但绝不是肤浅的、随意的。虽然没有上升到理论化、形式化的程度,但控制论思想在整个工艺流程中被简洁、巧妙、系统化地使用,从而以极低的成本实现了极高的误差约束与充电/数据传输性能保障。下面我们列举几个典型的场景应用及其实际效果。

**场景一:拉单丝((1)(2)(3))**——通过控制拉丝力度,将粗铜杆拉伸成给定直径的均匀细铜丝。作为初始原材料,铜杆直径并不均匀,需要动态监控输入的铜杆直径来调整拉丝力度,才能保证输出的细铜丝比较均匀。理论上,将直径约1毫米的粗铜杆拉成手机连接线所需的80微米细铜丝,需要保证工艺的高精度并可以一步完成,要求拉丝的设备必须具备非常精准的力度控制和非常灵敏的反馈调节,导致这样的设备非常昂贵。因此,实际生产中双马公司的研发人员将拉丝工艺拆分成三步:中拉单丝、小拉单丝和微拉单丝,每一步只需要做到较高(而不是很高)的精准度和灵敏度即可,所需设备会便宜很多,控制方法也不是很复杂。具体来说,只需要使用工业生产中常用的“比例积分微分”(PID)控制方法<sup>[5]</sup>,即基于某个已知变量(铜丝直径)的实际值和设定值的误差(P)、利用系统过去积累的信息(I)和已知变量将来的变化趋势(D)计算出受控对象(拉丝力度)的调整方法,其结构简单但可靠性高,非常适合手机连接线的制造场景,能将最终的铜丝直径误差控制在0.2%以内。

**场景二:单丝退火((4))**——通过控制热处理电压(电流),使铜丝能够均匀受热再冷却,电气性质更加稳定。由于不同产品线需要不同规格的铜丝,因此退火过程最好能够适应以各种速度通过

电压(电流)的不同直径的铜丝,使它们的退火程度相对一致,避免产生缺陷。如果退火设备无法进行退火电压及电流的调节,那么对于不同规格的铜丝就得使用不同设备进行退火,设备和能源开销很大。因此,双马公司的研发人员设计出一机多用的退火设备:监控单丝通过设备的速度,结合拉丝工艺中设定的参数,基于反馈调节原理动态调节退火电压,从而保证铜丝的退火程度较为一致。由于经过拉丝工艺后铜丝直径的误差已经较小,并且退火电压的控制并不需要像拉丝那样准确和实时,因此控制策略比PID更为简单,不涉及控制误差的导数(D),从而简化为PI。

**场景三:束丝绞丝((6)(9)(11))**——通过控制多股输入线材之间的角度,使缆线之间的绞合程度适当,减少线材的磨损。在实际生产中,绞合程度很难直接测量,甚至都很难精确定义。因此,双马公司的工程师们想出了间接控制绞合程度的方法:由于绞合程度主要与线材的角度、直径和张力有关,其中线材直径可以直接从前序工艺获得,线材张力又相对易于测量,从而可以通过调整输入线材之间的角度来控制绞合程度。就控制方法而言,是通过控制一个信号(线材之间的角度)去追踪一个未知的目标信号(绞合程度),和常见卡尔曼(Kalman)滤波方法<sup>[6]</sup>的原理一致。

**场景四:发泡挤塑绝缘((7))**——通过控制发泡绝缘层(和铜丝直接接触的绝缘层)的冷却时间,使绝缘层具有均匀的电气性能。工业生产中常用水槽对绝缘层进行冷却,冷却时间长短通过水槽的移动来控制,这里麻烦的是如何测量绝缘层的电气性能。全面的方法需要测量材料的击穿电压、电阻率、相对介电常数等一系列数据,然而测量的数据种类和精度越高,所需的仪器设备也越昂贵。为了控制成本,双马公司的工程师们使用电容值间接刻画绝缘层的电气性能,根据电容值实时控制水槽的移动,使线缆的不同部分具有相近的绝缘性能。相比直接测量,间接测量肯定会引入较大误差,因此这步工艺之后紧接着就是高压绝缘测试,以避免大误差的存在。上述方法符合带微分滤波器<sup>[7]</sup>的PID原理,

能够减少控制输出的波动，在保证绝缘层性能的同时尽量避免频繁的机械操作，从而延长机器寿命。

**场景五：外被押出 ((13))**——通过控制押出绝缘层（线材最外侧的塑胶层）的冷却时间，使之具有均匀的电气性能。这一步和前面介绍的发泡挤塑绝缘类似，但后者需要与铜丝紧密接触、不留缝隙，而前者并不需要如此强的密封性。因此，虽然双马公司的工程师们也用电容值来间接评估绝缘层的电气性能，但控制方法不需要那么严格，普通PID足以胜任。同样，间接评估必然会导致较大误差，所以紧接着就是火花绝缘测试以避免大误差的存在。相应地，不难理解火花绝缘测试的电压（一般为10千伏）会比高压绝缘测试的电压（一般为15千伏）低一些。

**场景六：阶段测试 ((8)(14)(21)(24)(26))**——手机连接线的生产过程涉及各种性能指标的测试，它们并不是简单地集中在出厂之前一次性进行，而是分散在工艺流程的各个阶段，从而能够更早发现材料缺陷以及工艺问题，提前淘汰一些不合格的材料，减少后续工艺中不必要的浪费。因为测试过程中的受控对象（质量等级）通常是离散的（如通过/不通过）且突然变化的，因此上述过程实际上属于多级乒乓控制（Bang-bang Control）<sup>[8]</sup>，最终将整个工艺流程的良品率控制在99.97%以上。

相信读者们已经发现，上述六个场景中列举的工艺流程看似毫不相干，其背后却具有本质的相似性：这些工艺都通过负反馈信息实现了自稳控制，如表1所总结的内容。当正常运转的工业系统受到环境等因素干扰而偏离稳定点时，它使用收集到的反馈信息对受控对象加以调节，以保证系统按其设定的控制目标运行。这就是控制论的核心思想。事实上，这种思想的应用远不局限于以上六个场景，更不是手机数据线工艺所独有的。

## 结语

人情练达未必能写出好文章，但世事洞明确实

表1 手机连接线制造工艺中运用的控制论方法

| 工艺                      | 受控对象 | 已知变量      | 控制论方法       |
|-------------------------|------|-----------|-------------|
| 中拉单丝、小拉单丝、微拉单丝          | 拉丝力度 | 单丝直径      | PID比例积分微分控制 |
| 单丝退火                    | 退火电压 | 单丝速度、单丝直径 | PI比例积分控制    |
| 多股束丝、对绞、成缆绞合            | 线材角度 | 线材张力、线材直径 | Kalman滤波    |
| 发泡挤塑绝缘                  | 水槽移动 | 材料电容      | 带微分滤波器的PID  |
| 外被押出                    | 水槽移动 | 材料电容      | PID比例积分微分控制 |
| 高压绝缘测试、火花绝缘测试、电气测试、出厂测试 | 质量等级 | 各项电气指标    | 乒乓控制        |

都有不凡的学问。计算机学科从其诞生的那天起，就一直和人类生活紧密关联。科研不一定来源于实验室，更不能止步于实验室。作为开源硬件工程的一次初步探索，我们对手机连接线生产制造的整个工艺流程形成了比较全面和深入的认知；但是对于流水线上诸多机器设备的工作原理，我们仍然知之甚少，因此所达到的“开源”程度依然有限，期待同仁的补充和改进。

我们在考察中注意到：流水线上的机器设备虽然多数产自东莞，但其上的汉字多是繁体字，因为其核心技术来自中国台湾。联想到前几天看电影《九阴白骨爪》，其中黄药师对梅超风说：“天下第一，何及真心真意？”我国作为全球最大的制造业国家，手机连接线生产数量也应是世界第一，但其中多少真“芯”真“艺”，目前看来还是顾虑重重，产业的关键技术节点并非自主可控。由此亦可见，开源硬件工程任重而道远，是我们这一代计算机工作者需要勇敢面对的艰巨任务和当仁不让的历史使命。■

**致谢：**本文工作得到国家自然科学基金项目（61822205、61902211）的资助。

**李振华**

CCF 高级会员。清华大学软件学院副教授、博导。主要研究方向为移动网络通信、移动操作系统、云计算和云存储。  
lizhenhua1983@tsinghua.edu.cn

**仇嘉星**

CCF 学生会会员。清华大学人文学院外文系本科生，辅修计算机软件。主要研究方向为移动操作系统和移动模拟器。  
jx.qiu@outlook.com

**林 灏**

CCF 学生会会员。清华大学软件学院博士生。主要研究方向为移动网络通信、移动操作系统和移动模拟器。  
linh20@mails.tsinghua.edu.cn

**宫良一**

CCF 专业会员。清华大学软件学院博士后、助理研究员。主要研究方向为网络安全、移动操作系统和移动模拟器。  
gong2019@tsinghua.edu.cn

**张 祥**

江苏双马线缆科技有限公司总经理。主要工作为电线电缆的制造技术研发、生产和销售。  
zhang1077@163.com

## 参考文献

- [1] 4岁小女孩给Linux内核贡献提交[OL]. <https://blog.csdn.net/wuShiJingZuo/article/details/103790304>.
- [2] Arduino 开源硬件计划[OL]. <https://www.arduino.cc/>.
- [3] 江苏双马线缆科技有限公司(天眼查信息)[OL]. <https://www.tianyancha.com/company/3018260472>.
- [4] 钱学森. 工程控制论[M]. 上海交通大学出版社, 2007: 310.
- [5] Ang K H, Chong G, Li Y. Efficiently, PID Control System Analysis, Design, and Technology[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(4):559-576.
- [6] Kalman R E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1):35-45.
- [7] Isaksson A J, Graebe S F. Derivative Filter is an Integral Part of PID Design[J]. *IEEE Proceedings - Control Theory and Applications*.2002, 149(1): 41-45.
- [8] Bellman R, Glicksberg I, Gross O. On the "Bang-Bang" Control Problem[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1956: 14(1):11-18.

(本文责任编辑: 许辰人)