



北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

第二十七届“冯如杯”学生创意大赛论文

基于原有键程的薄型机械键盘轴体

2017年3月15日

摘要

随着电脑硬件的不断发展和更新，现如今笔记本硬件水平对于一般办公来说已经大大过剩，于是人们把目光放在了提升操作体验上。机械键盘拥有更好的弹性回馈力度和更舒适的手感，受到更多追求手感的用户们的欢迎。但目前市面上笔记本电脑多应用 X 结构的薄膜键盘，和机械键盘的结合做的很差，以至于许多需要用到机械键盘的用户都选择外接机械键盘。这与笔记本电脑的便携性和轻便的体验是背道而驰的。机械键盘的手感生命力在于回馈力度，而保证回馈力度的前提是机械键盘的键程。所以在保证原有键程的前提下，尽可能缩小轴体所占用空间便成为将机械键盘移植于笔记本的关键。而压缩式机械键盘轴体具有兼容性好、成本低、需求空间较少等优势，成为解决这一问题的首选。本文从市场情况与市场已有的安装于笔记本的机械键盘入手，阐述了压缩式机械键盘轴体的可行性和初步构想，并分析了该项目的应用前景。我相信在压缩式轴体的帮助下，具有便携性的机械键盘笔记本可以更快地由蓝图变为成果。

关键词：笔记本电脑，机械键盘，轴体

Abstract

Today, with the continuous development of computer hardware, the laptop hardware's level has been greatly surplus for general office, so people begin to focus on the operation experience ascension. Mechanical keyboard have better elasticity feedback and feel more comfortable, which make it more popular. But at present, most of laptops use the X-structure keyboard, which is a kind of membrane keyboard, on the market. And the combination of mechanical keyboard and laptop is very poor, so that many users who need to use the mechanical keyboard always choose the external mechanical keyboard, which is opposite with the laptop's portability and handy experience. Mechanical keyboard handle vitality lies in the feedback, and the precondition of the feedback strength is the actuator travel of mechanical keyboard keys. So how to guarantee the premise of the original actuator travel, as far as possible, and narrow the switch occupied space will become the key for transplanting mechanical keyboard to the laptops. And the compression type's mechanical keyboard switch has good compatibility, low cost and less space advantage, which become the first choice to solve this problem. In this paper, from the mechanical keyboard on the laptop that have appeared at the market, the paper narrate the feasibility and preliminary compression type of the mechanical keyboard shaft body idea, then analyzes the application prospect of this project. I believe that with the help of the compression type shaft body, the laptop has portable mechanical keyboard can be changed from blueprint into faster results.

Key words: laptop, mechanical keyboard, switch

目录

| | |
|--------------------------|----|
| 一、研究背景..... | 1 |
| （一） 笔记本电脑市场现状分析..... | 1 |
| （二） 机械键盘市场现状分析..... | 3 |
| （三） 市场现有案例分析..... | 5 |
| 1、msiGT80..... | 5 |
| 2、联想拯救者 Y910..... | 6 |
| 二、研究内容..... | 9 |
| （一） cherry MX 轴概述..... | 9 |
| （二） cherry MX 轴内部结构..... | 12 |
| 三、方法分析..... | 14 |
| （一） 轴芯下移..... | 14 |
| （二） 缩短弹簧长度..... | 15 |
| （三） 降低键帽高度并将键帽下移..... | 18 |
| 四、效果分析..... | 20 |
| 五、发展前景..... | 22 |
| 结论..... | 22 |
| 参考文献..... | 24 |

图表清单

| | | |
|------|-------------------------------|----|
| 图 1 | 机械键盘产品消费观察..... | 1 |
| 图 2 | 2016 年笔记本电脑用户关注类别分布..... | 2 |
| 图 3 | WW PC Gamer prediction..... | 2 |
| 图 4 | 2016 年中国游戏笔记本不同价格段关注比例分布..... | 3 |
| 图 5 | 机械键盘产品消费观察..... | 4 |
| 图 6 | 机械键盘理想价位..... | 4 |
| 图 7 | msiGT80..... | 5 |
| 图 8 | msiGT80 配置表..... | 5 |
| 图 9 | msiGT80 重量测量..... | 6 |
| 图 10 | 联想拯救者 Y910..... | 6 |
| 图 11 | TTC 薄型机械轴..... | 7 |
| 图 12 | 联想拯救者 Y910 重量测量..... | 7 |
| 图 13 | TTC 薄型机械轴拆解图..... | 8 |
| 图 14 | cherry MX 红轴..... | 9 |
| 表 15 | cherry MX 轴体参数..... | 10 |
| 图 16 | cherry MX 轴体参数..... | 10 |
| 图 17 | cherry MX 轴体键帽排列..... | 11 |
| 图 18 | cherry MX 轴体-PCB 板侧视图..... | 12 |
| 图 19 | cherry MX 轴体-PCB 板焊接位置..... | 12 |
| 图 20 | 轴体 3D 建模及其剖视图..... | 12 |
| 图 21 | 轴芯 3D 建模..... | 13 |
| 图 22 | 轴体下盖操作示意图 1..... | 14 |
| 图 23 | 轴体下盖操作示意图 2..... | 15 |
| 图 24 | 轴体下盖尺寸说明..... | 17 |
| 图 25 | 轴芯尺寸说明..... | 18 |
| 图 26 | 轴芯操作示意图 1..... | 18 |
| 图 27 | 轴芯操作示意图 2..... | 19 |

| | | |
|------|---------------|----|
| 图 28 | 最终效果剖视图..... | 20 |
| 图 29 | 最终效果整体图示..... | 21 |

一、研究背景

（一）笔记本电脑市场现状分析

随着移动便携式终端的蓬勃发展，智能手机、平板电脑等电子设备以极快的速度占有市场。这也使得作为老牌产业的台式机和笔记本电脑(Laptop)行业处于低迷态势。全球范围内的个人电脑出货量在 2011-2016 四年内接连下滑，但在 2016-2017 年度，消费者开始重新关注笔记本电脑市场，笔记本市场开始逐步回暖。

购买笔记本电脑意向调查

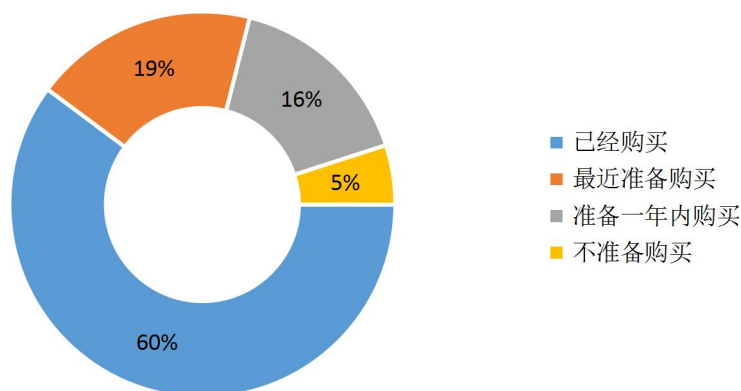


图 1 机械键盘产品消费观察

近期调查表明（图 1），在接受采访的近一万名消费者中，有六成的消费者已经购买笔记本电脑。这组数据说明了国内笔记本电脑的销售市场已经比较成熟，不再适合用量产化、无特点的笔记本电脑再进行大范围的推广销售。若厂商想要继续扩大市场，就需要有目标地针对不同消费团体的喜好和需求，进行笔记本电脑技术革新，才能完成销售目标。

根据互联网调研中心 2016 年收集到的数据（图 2）显示，有 35.2% 想要购买笔记本的用户在关注游戏型笔记本，如果再将娱乐型笔记本算作游戏型笔记本的一种，那么关注游戏型笔记本的用户多达 56.8%。从这个数据中我们可以得出结论：有近六成的购买者购买笔记本电脑是为了游戏和娱乐，这也和近几年游戏型笔记本销量的异军突起有很大联系（图 3）。

2016年笔记本电脑用户关注类别分布

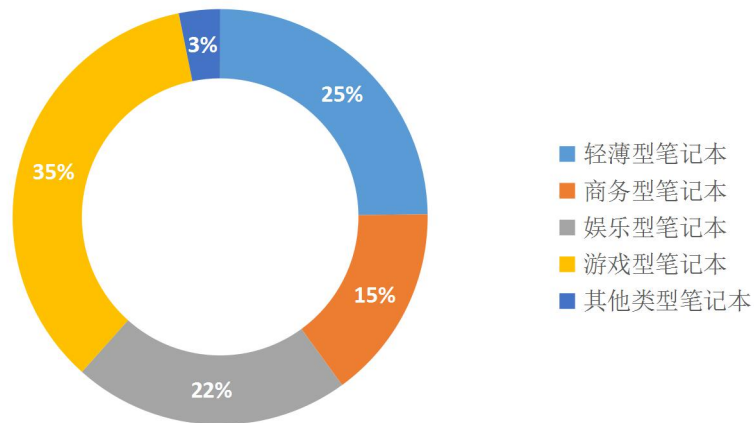


图 2 2016 年笔记本电脑用户关注类别分布

然而再研究图 2 中数据，发现用户对轻薄型笔记本也拥有一定的关注度。这提醒了生产厂商：若是能将轻薄型笔记本与游戏型笔记本相结合，便能更好地迎合消费者的胃口。可以大胆地说，如果游戏型笔记本能将轻薄化做好，那么所有的笔记本消费者都将是游戏型笔记本的潜在购买者。而如何将对性能和散热需求极大的游戏型笔记本轻薄化，也成为了厂商们亟待解决的难题。

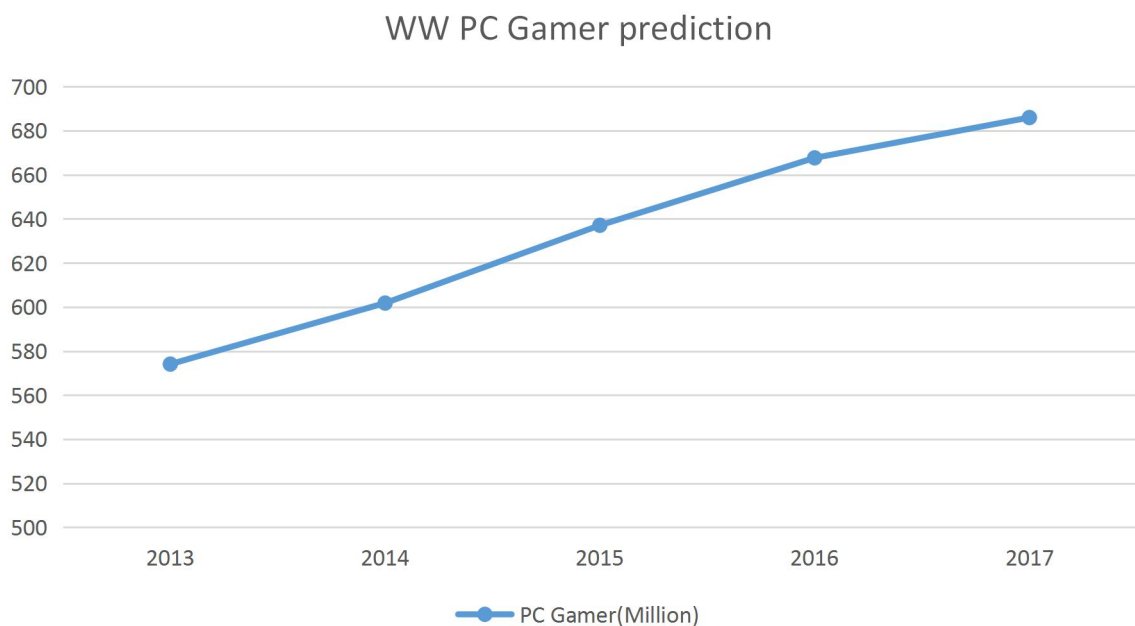


图 3 WW PC Gamer prediction

再关注用户对游戏本不同价位的兴趣（图4）。我们可以发现用户对于各个价位段的游戏型笔记本普遍接受，但值得关注的是，5000元-6000元价位段的笔记本被广泛关注。必须要注意的是，对于价格轻松破万的游戏本来说，这个价格区间是绝对的低价位区间。由此可以说明消费者对于低价位、高性价比的游戏型笔记本显示出更大兴趣。这也体现出了现如今笔记本生产控制成本的重要性。

有统计数据表明，游戏型笔记本的平均价格维持在6500元左右，相较于非游戏型笔记本的均价高出2300多元。但随着游戏本市场的发展，游戏型笔记本的产品差异性正在逐步降低，在日趋激烈的游戏本市场竞争中，价格的下降和性价比的提升必然会成为未来游戏本发展的普遍趋势。

2016年中国游戏笔记本不同价格段关注比例分布

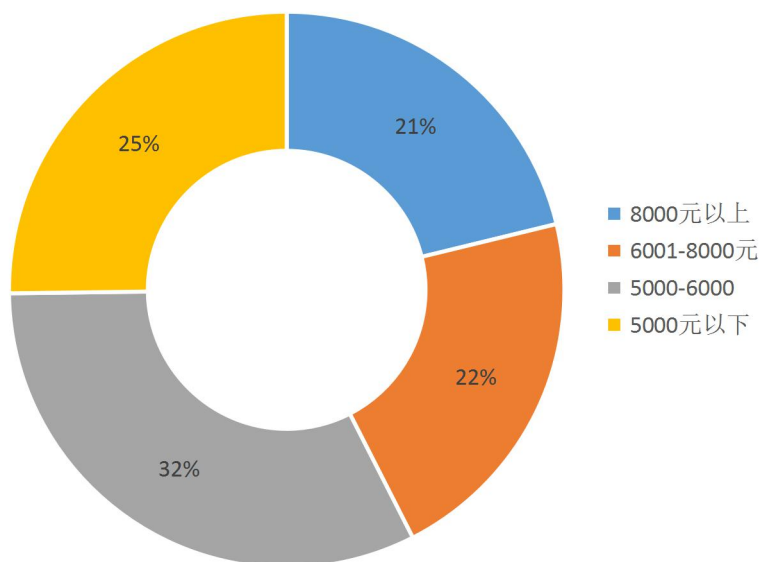


图4 2016年中国游戏笔记本不同价格段关注比例分布

（二）机械键盘市场现状分析

机械键盘是一个很传统的计算机硬件设备，机械键盘最突出的特点便在于机械键盘的每个按键下方都有一个单独的轴体(Switch)，从而控制按键的闭合。而单独的轴体也使得机械键盘拥有更优秀的弹性回馈力度和更舒适的手感。相较于现在广泛应用的薄膜键盘，机械键盘更是拥有易于修理的优点。目前市面上出现的各种机械键盘产品，有效地刺激了消费者的关注度。

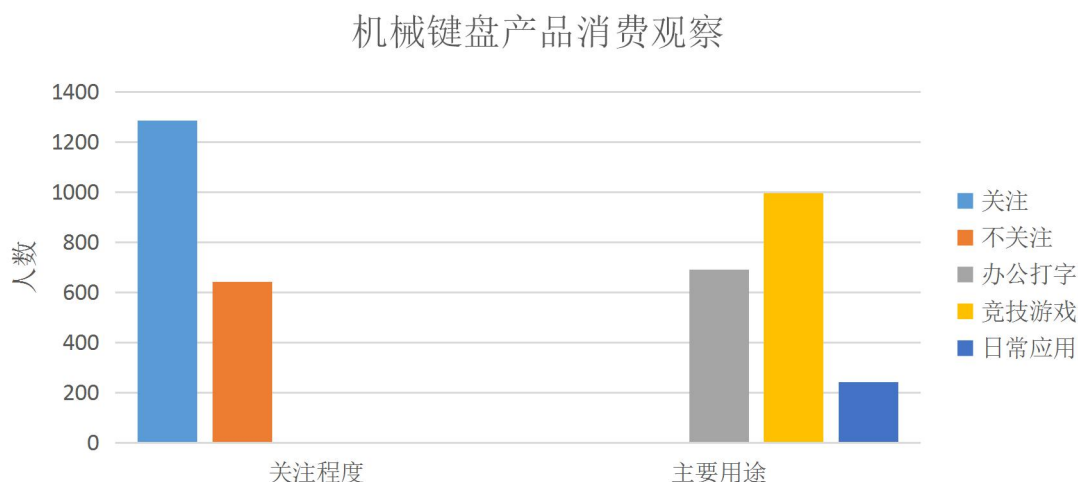


图 5 机械键盘产品消费观察

相关调查表明（图 5），有超过 65% 的被采访用户都对机械键盘表示关注，这也让我们对机械键盘市场的前景充满信心。而在购买机械键盘的用途方面，游戏竞技与办公打字占了绝对的主体。与之用途相契合的游戏娱乐型笔记本电脑与轻薄商务型笔记本电脑也正是笔记本电脑销售的主要方向。这两者的契合说明了将机械键盘移植于笔记本电脑的前景可观。

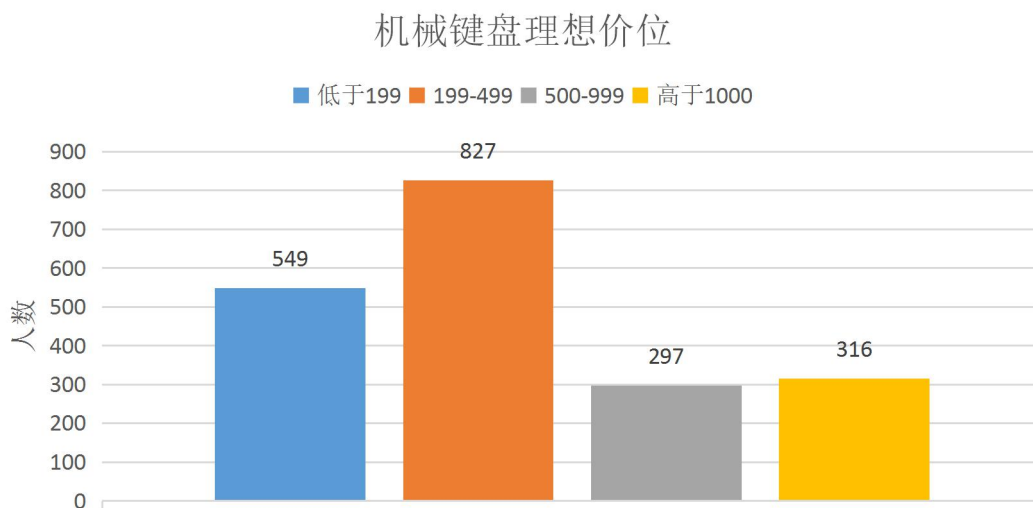


图 6 机械键盘理想价位

虽然目前广大用户已经愿意为机械键盘投资，但根据另一项调查（图 6），比例高于 40% 的受采访的用户都倾向于 199 元-499 元的价格区间中的机械键盘。除此之外，也有许多人选择了 199 元以下的低价位。然而，不论是低于 199 元或是 199 元-499 元，对于成本较高的机械键盘来说都是不折不扣的低价位区间。这也体现了移植机械键盘时保持低成本的必要性，低价位机械键盘的市场前景也被广泛看好。

（三）市场现有案例分析

1、msiGT80



图 7 msiGT80

微星 msiGT80（图 7）是微星笔记本于 2015 年 1 月推出的笔记本，准系统代号为 MS-1812，于 2016 年 1 月宣布停产。这款笔记本是近几年市面上推出的首款搭载机械键盘的笔记本，微星公司进行了大胆的尝试，但此款笔记本除了简单地移植机械键盘外，并没有任何可以称赞的创新点。

| | 品牌 | 型号 | 主要参数 |
|------|-------------|---------------------|---|
| CPU | Intel(英特尔) | Core i7-4720HQ | 4C/8T，主频2.6Ghz，睿频3.4-3.6Ghz，L3缓存6M |
| 显卡 | Nvidia(独显) | Geforce GTX980M SLI | GM204核心，2*1536SP，频率1038-1127mhz，显存总量2*8GB GDDR5 |
| | Intel(核显) | HD Graphics 4600 | GT2架构，20EU，频率400-1200mhz，无eDRAM |
| 芯片组 | Intel | HM87 | - |
| 内存 | 海力士 | - | 2*8G DDR3L 1600mhz 11-11-11-28 |
| 硬盘 | 金士顿(SSD) | SNS8100S3128GD1 | 2*128G SATA 6Gbps速率 M2.2280接口 RAID 0模式 |
| | 日立(HDD) | 7K1000 | 1TB 7200RPM 32MB缓存 2.5寸SATA3接口 9.5mm厚度 |
| 屏幕 | Samsung(三星) | LTM184HL01 | 18.4寸1920*1080 PLS雾面屏 |
| 音响 | - | - | 2.1声道 丹拿认证 |
| 键盘 | Cherry(樱桃) | - | 红色背光机械键盘，无小键盘 |
| 声卡 | Realtek(瑞昱) | ALC892 | 支持5.1声道，包含sound blaster cinema2音效 |
| 网卡 | 钰硕Killer | E2200 | 杀手千兆有线网卡，配有流量管理软件 |
| | 钰硕Killer | N1525 | 802.11n/a/ac网卡，M2.2230接口 |
| 电池 | - | BTY-L7B | 14.4V*5225mAh=75.24Wh(标称) 锂离子电池 |
| 电源 | Delta(台达) | ADP-330AB D | 额定功率19.5V*16.9A=330W |
| 操作系统 | Microsoft | - | windows 8.1 x64中文版 |
| 尺寸 | - | - | 456(W)*330(D)*49(H)mm(官方数据) |
| 重量 | - | - | 4.5KG(含电池，官方数据) |

图 8 msiGT80 配置表

GT80 笔记本单纯地将厚重的机械键盘移植于游戏型笔记本电脑上，使得电脑重量大大增加，便携性大大降低，再加上游戏型笔记本所必须的高端硬件配置（图 8），发售价达到了 25999 元，可以说此款电脑完全丧失了便携性与性价比。



图 9 msiGT80 重量测量

其 6.249kg（图 9）的重量和最薄处 4.9mm 的厚度都让其饱受诟病，而造成这种局面的一大原因就在于：微星公司并没有对机械键盘的轴体厚度做出任何处理，从而导致了键盘所需空间过大，无法与其余零部件安装在同一面板下，使得笔记本面板处的空间做出极大牺牲。这也导致了笔记本操作面板处极其畸形的设计——键盘全部集中在下半部分。这使得其与传统笔记本在外观上拥有巨大的差异，让人感到不适。

总结来说，这款仅仅发售一年就下架的笔记本电脑可以说是微星公司失败的一次尝试。不加更改的机械键盘设计使其拥有了消费者难以接受的重量和体积。厂商将这种电脑生产成笔记本电脑，产品却已经完全丧失了笔记本电脑的特性。在 25999 元的低性价比下，能够花大价钱购买这种电脑的消费者可谓少之又少。

2、联想拯救者 Y910



图 10 联想拯救者 Y910

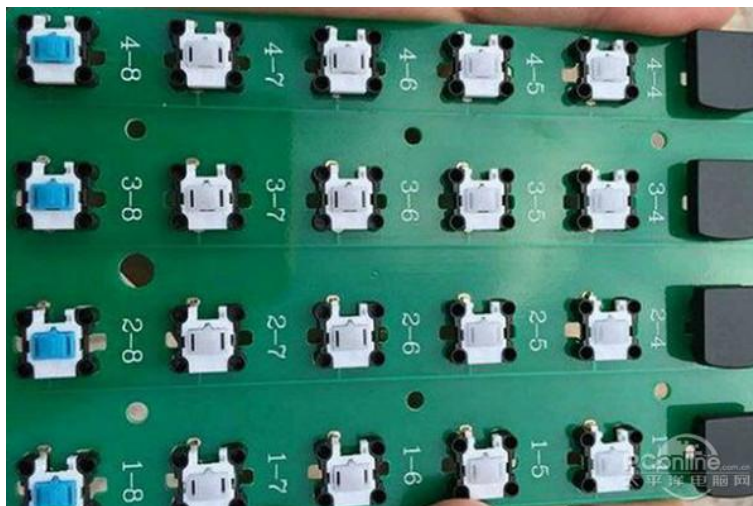


图 11 TTC 薄型机械轴

联想拯救者 Y910（图 10）是联想公司于 2016 年 11 月推出的新款游戏型笔记本电脑。Y910 笔记本首次搭载了由 TTC 公司研发的薄型机械键盘轴体（图 11）。此款笔记本电脑的价格为 23999 元，虽然与 msiGT80 的发售价相差不多，但市场口碑却明显好于 GT80，其成功主要原因都应归功于这新型的机械键盘轴体上。



图 12 联想拯救者 Y910 重量测量

较为轻薄的机械键盘轴体可以大大减轻笔记本电脑在空间和重量上的负担。5.388kg 的重量（图 12）足足比上一代机械键盘笔记本轻了近 1kg，在每 1g 重量都要细细斟酌的笔记本电脑上，这个重量差距就显得尤为夸张了。这也大大刺激了消费者的购买欲望。

但反观 TTC 薄型机械键盘轴体，仍有两个致命的缺点。



图 13 TTC 薄型机械轴拆解图

首先, TTC 薄型机械键盘轴体的全键程在 1.6mm~2.5mm 之间(图 13), 相较于经典机械键盘 4mm 的全键程来说, 键程近乎缩短了一半。而对于习惯触发键程达到 2.4mm 的青轴机械键盘来说, 以往刚刚能够触发轴体内开关闭合, 按键开始响应的按压程度, 在 TTC 薄型机械键盘轴体上已经将轴体压到了最底——而触发按键自然远小于此, 键盘早就开始响应了。这让习惯于传统机械键盘的人无法很快适应。而过短的触发键程, 已经失去了此款键盘作为机械键盘的意义。键程的缩短, 必然意味着键盘对于手指反馈感的降低, 键盘手感也会越来越向着薄膜键盘的手感靠拢。使得 TTC 薄型机械键盘的使用手感已经与机械键盘大相径庭, 可以说其已经失去了机械键盘大部分的优秀手感。

其次, TTC 薄型机械键盘安装在一种特殊开孔的 PCB 板面上, 而除此之外市场上所有的机械键盘已经规定了轴脚的安装方式。这种安装方式作为一种规范早已被市场所默认, 而 TTC 键盘的特立独行必然会带来兼容性的问题。甚至连轴体故障后能否更换轴体也是一个未知数。

总结来说, TTC 薄型机械键盘的出现是迎合市场的必然结果。但其已经丧失了作为一个标准的机械键盘来说必要的特性, 是一款不尽人意的机械键盘移植作品。那如何才能将机械键盘的特性移植于笔记本, 这就需要先对机械键盘的轴体进行分解。

二、研究内容

（一）cherry MX 轴概述



图 14 cherry MX 红轴

提到机械键盘的轴体，多数人脑海中浮现出的便是 cherry MX 轴，因为 cherry 轴体已经被广大消费者所认可，所以这里也挑选出 cherry MX 红轴（图 14）作为分析的样本。

目前市面上还在销售的 cherry 轴体可以分为四种，根据轴体不同的颜色，消费者普遍称之为黑轴、青轴、红轴、茶轴。四种轴体各有特色，下面介绍一下关于机械键盘轴体的名词解释。

触发：指机械键盘轴体开关闭合，计算机接收到键盘电子信号。上图中随着轴芯被按下，两个金属片接通，向 PCB 板传送电子信号。

全键程(Actuator travel)：机械键盘轴体的轴芯被按下时完成整个运动所作出的竖直位移。

触发键程(Pretravel)：机械键盘轴体的轴芯下降到某个程度，能够使得金属片互相接通，此时轴芯所做出的竖直位移。

初始压力(Initial force)：外物下按机械键盘，在轴芯即将发生位移时受到的压力。

触发压力(Actuation force)：外物下按机械键盘，到触发时受到的压力。

触底压力：外物下按机械键盘，到底部时受到的压力。

表 15 cherry MX 轴体参数

| | 黑轴 | 青轴 | 红轴 | 茶轴 |
|------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 外部型号 | MX Black | MX Blue | MX Red | MX Brown |
| 全键程 | 4-0.4mm | 4-0.5mm | 4-0.4mm | 4-0.4mm |
| 触发键程 | 2±0.6mm | 2.2±0.6mm | 2±0.6mm | 2±0.6mm |
| 初始压力 | 30cN min. | 25cN min | 30cN min | 30cN min |
| 触发压力 | 60±20cN | 50±15cN | 45±15cN | 45±15cN |
| 触底压力 | 90cN max. | 60cN min. | 60cN min | 60cN min. |

为了统计方便，这里使用 cN 单位替代 N 单位，其中 1N=102cN（表 15）。

市面上大多数轴体为了更好的互相兼容，都采用了同样的大小规格，如下图（图表 16）所示，括号外单位为英寸，括号内单位为毫米。

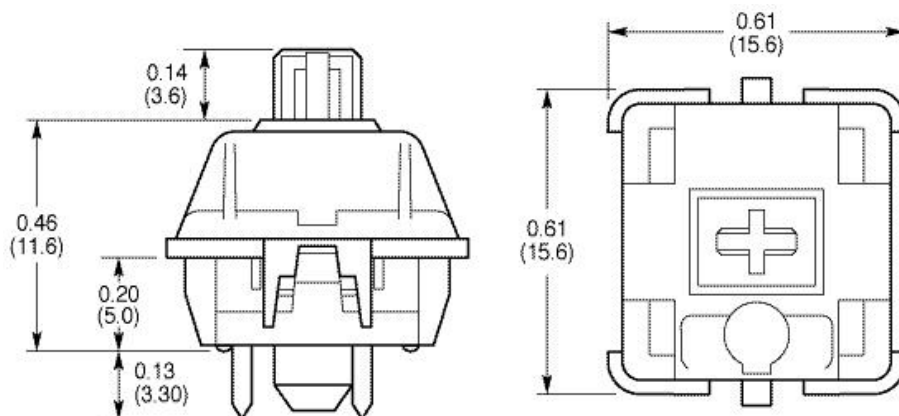


图 16 cherry MX 轴体参数

为了保持机械键盘制作的规范和更换轴体的便捷性，我们在制作新型轴体时应当保持原有的长度和宽度不变，即仍旧为 15.6mm*15.6mm 的正方形结构。

由上图可知，机械键盘轴体竖直方向上，主要可分为四个主要组成部分。最上方是裸露出的轴芯（十字形），高度为 3.6mm，其作用为链接上方的键帽并传导手指按压的力。下方是轴体的上盖和下盖，分别为 6.6mm 与 5.0mm。最下方是裸露的针脚和一个固定用的圆柱与圆台的结合体，用于与下方的 PCB 板固定并焊接，高度为 3.3mm。原轴体竖直高度总和 $H_{\text{原}}$ 可计算：

$$H_{\text{原}} = 3.6\text{mm} + 11.6\text{mm} + 3.3\text{mm} = 18.5\text{mm}$$

而在实际使用过程中，机械键盘的轴体不可能脱离键帽单独使用，所以安装上键帽以后增加的高度是必须考虑进去的。根据官网给出的数据，我们再来看轴体安装上键帽以后的效果（图 17）。

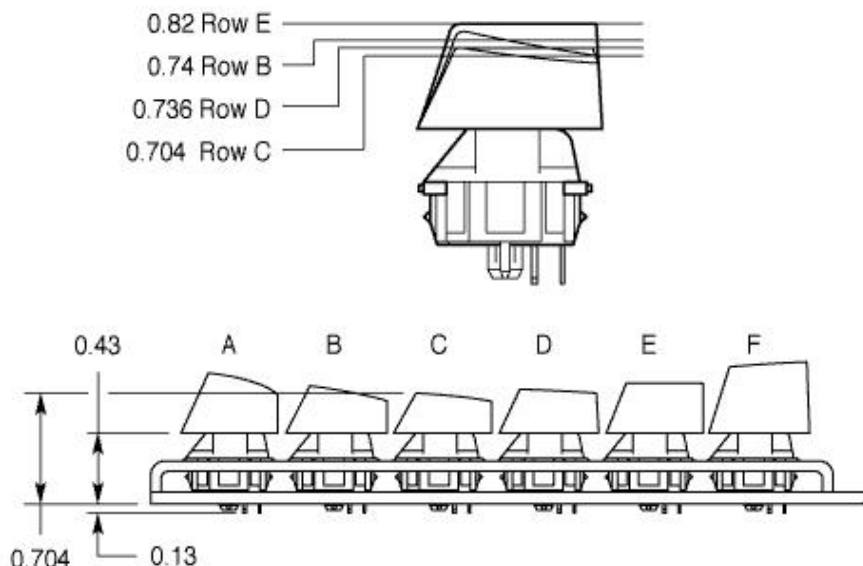


图 17 cherry MX 轴体键帽排列

上图所示的键帽高度排列是市面上常见的一种，cherry 生产的大部分机械键盘也符合该标准。经过同类别比较，此种依据人体工程学排列的键帽高度是市场上最低的一种。但即便是如此，在 cherry 官网上给出的数据中，最低的 Row C 行的高度也达到了 20mm 以上；而最高的 Row F 行高度更是超过了 26.5mm。

$$H_C = 0.704in + 0.13in = 0.834in \approx 21.18mm$$

显然，想要移植笔记本电脑，键帽不能为轴体增加过多多余的高度。参考市面上所售卖的主流笔记本电脑，并没有哪款笔记本电脑使用了人体工程学的键帽排列。所以，真正移植时我们所应用的键帽不会高于 Row C 的键帽高度。在研究轴体时，我们可以先不用考虑键帽所带来的高度。

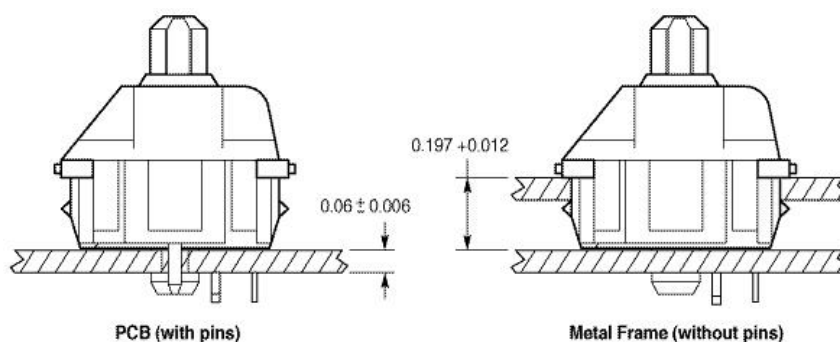


图 18 cherry MX 轴体-PCB 板侧视图

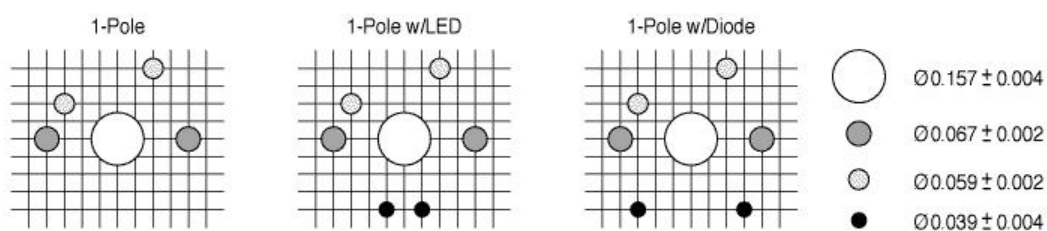


图 19 cherry MX 轴体-PCB 板焊接位置

上图是机械键盘轴体在 PCB 板上焊接的位置示意图（图 18、19），从图中我们可以看出，想要将轴体固定在 PCB 板上，那么中间的固定用圆柱必须保留。而作为笔记本电脑来说，上层的定位板（18 右图上方板）也是不必要的。因为很少会有人在笔记本键盘上进行大规模的拆卸，所以仅仅是下方的 PCB 板就足够对轴体进行定位。

（二）cherry MX 轴内部结构

为了方便研究 MX 轴的内部结构，用 solidworks2016 对其进行建模（图 20）。

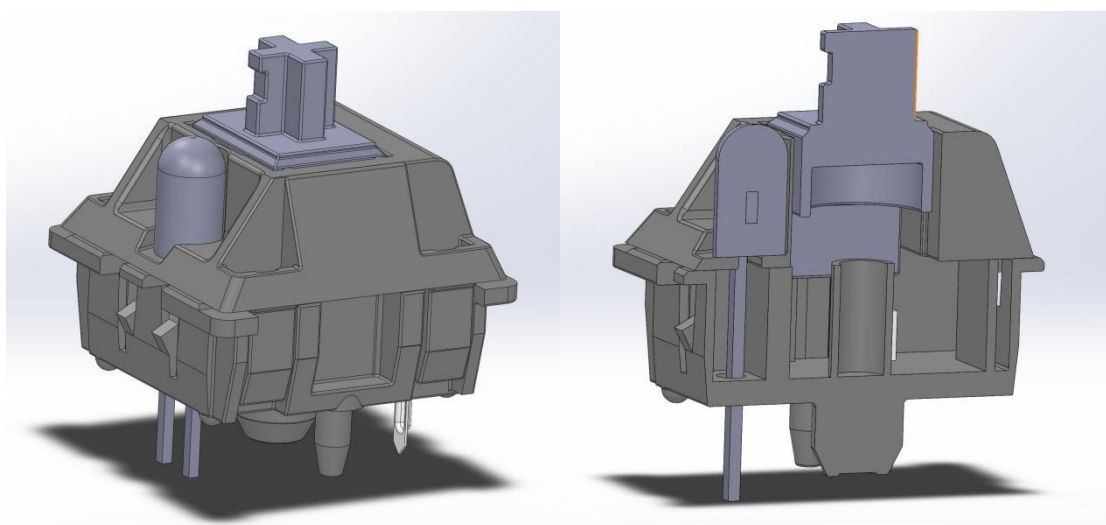


图 20 轴体 3D 建模及其剖视图

其中机械键盘轴体中的金属片与弹簧未在建模中体现。

轴体内部结构可大体分为三个部分：轴芯、轴体上盖和轴体下盖。上图中的 LED 灯泡与针脚可以在研究此问题时忽略掉。

下面对轴芯的结构进行分析（图 21）：

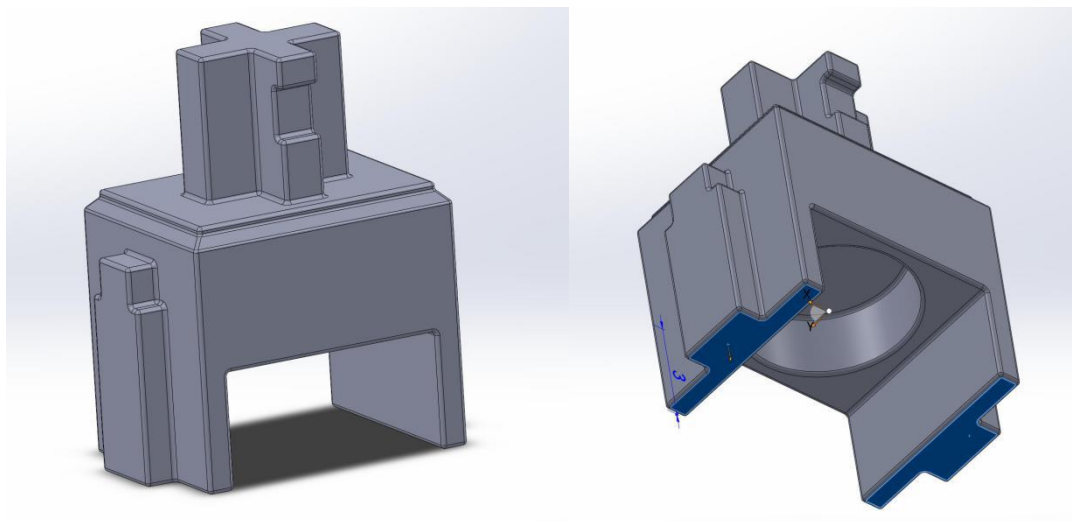


图 21 轴芯 3D 建模

轴芯的上半部分正如前文所说，其作用为连接键帽。下半部分内凹的圆柱用来与弹簧相接触，当手指下压键帽时，轴芯整体向下移动，同时下压弹簧。而此时弹簧给予轴芯的反作用力就是我们手指感受到的反馈力度。由此可知，对于线性轴体，比如红轴来说，我们手指感受到的反馈压力只与轴体内部的弹簧有关。而当我们把键帽按压到底部时，上图轴芯上所重点标出的下底面会与轴体下盖的上表面接触，此时弹簧被压缩至最短状态。轴芯从初始状态到最终状态的位移，就是我们所说的约为 4mm 的全键程。

通过简单的分析我们可以知道，想要在保持原有键程的前提下，缩小轴体所占的高度，有三种方案可供选择。我们的整体思路分为三种：

- 1、在不影响轴芯能够下落总位移的前提下，将轴芯与弹簧的初始状态位置与最终状态位置整体下移。

- 2、在尽可能保持总变化长度不变的情况下，缩短弹簧初始长度。

- 3、缩小轴芯下部侧脚以及轴芯上部裸露部分所占高度，将键帽整体下移。

下面来分别分析上述三种思路的可行性。

三、方法分析

（一）轴芯下移

若想要将轴芯的起始状态与停止状态整体下移，那么弹簧的位置必然也会随之向下移动。而显然，弹簧的位置是要低于轴芯的，那么我们则需要找到一个位置能够放置下移以后的弹簧。

恰巧，我们可以发现轴体下盖的下方，存在着一个用于固定轴体位置的类圆柱体。经过实体研究，发现这个圆柱体的中心位置是实心的，这也为我们安置弹簧提供了可能性——将圆柱体挖成空心并将弹簧下移至空心的圆柱体中。

在原有轴体中，通过测量轴芯内凹圆柱面和轴体下盖上表面的间距可以得出，原有轴体中弹簧的纵向放置空间为 8.5mm。也就是说，为了保持弹簧长度不变，轴芯下移后要保证弹簧的纵向放置空间仍旧为 8.5mm。于是先在轴体下盖上底面上紧贴原先固定弹簧的空心圆柱体，下挖一个半径为 1.5mm 的圆环，深度为 3.5mm，再将上部空心圆柱相应地降低 3.5mm。（图 22）

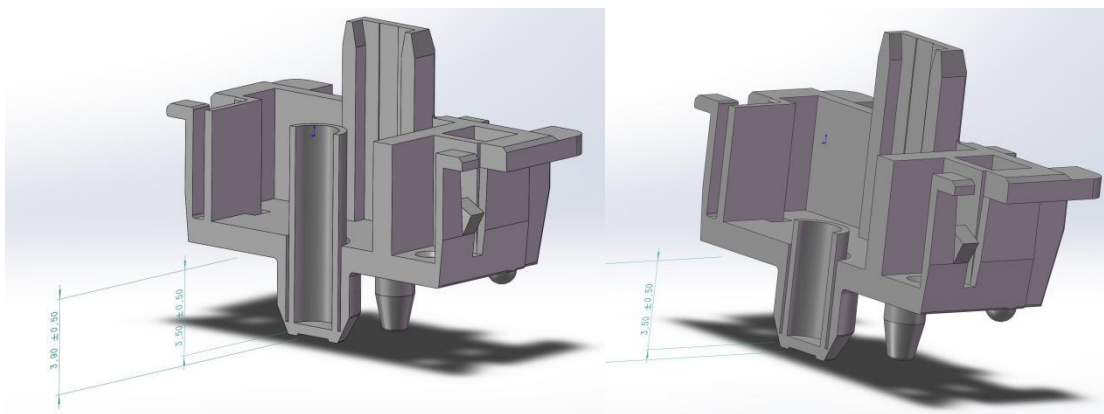


图 22 轴体下盖操作示意图 1

在这之后，再相应地整体降低轴体下盖边缘和金属片的高度，通过这次改进，轴体的高度可以相应地下降 3.5mm。（图 23）

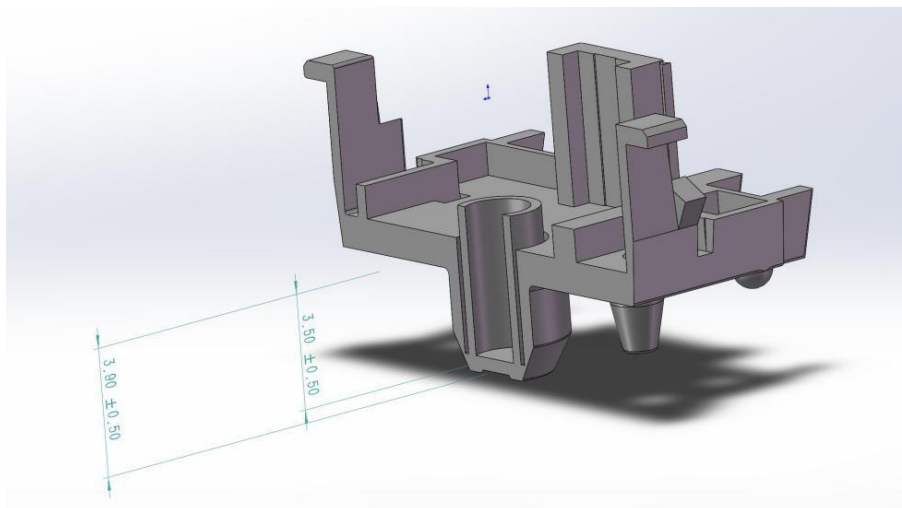


图 23 轴体下盖操作示意图 2

（二） 缩短弹簧长度

在不考虑段落感的情况下，弹簧不同是导致的键盘手感不同的最主要原因。但首先要明确的是，在静止状态下，轴体内的弹簧并不是处于完全伸展状态的，这一点从轴体的初始压力就能够知晓。

而作为正常的一款机械键盘，正常使用过程中轴体中的弹簧不可能超过其弹性限度，也就是说，我们可以运用胡克定律计算弹簧的弹性系数。

$$\Delta F = -k \times \Delta x$$

以红轴轴体为例，轴体中弹簧的弹性系数可以用轴体的初始压力 30cN、触发键程 2.2mm、触发压力 45cN 来计算弹性系数 k 与初始压缩量 x ：

$$\begin{cases} kx = 30cN \\ k(x + 2mm) = 45cN \end{cases} \xrightarrow{\text{解得}} \begin{cases} k = 7.5cN/mm \\ x = 4.0mm \end{cases}$$

从而可以计算出弹簧的初始长度 X ，其中 h 为弹簧纵向放置空间：

$$X = x + h = 4.0mm + 8.5mm = 12.5mm$$

在更改弹簧的尺寸之前，我们首先要明确的是，一旦弹簧的尺寸或是弹性系数被更改，则手感体验必然会与之前不同。因为在原有的初始压力、触发键程和触发压力的约束下，能够得出的弹性系数与弹簧尺寸的数值仅有唯一的一组。这就说明如果想要缩短弹簧的尺寸，就必然有一个初始属性要做出一定的让步。而显然的是，如果不一定量地

缩短触发键程或是全键程，那么对于弹簧长度的缩短将都是无意义的。因为那样的话，所缩短的弹簧尺寸会体现在弹簧的初始压缩量 x 上，并不会体现在轴体整体的样貌上，对于我们的目的是没有贡献的。

既然必须要一定量地缩短键程，那就有必要对于牺牲键程所带来的效益进行评估。不妨假设轴体的全键程缩短为原先的 λ 倍 ($\lambda \leq 1$)，则要想保证原有的初始压力和触发压力，则要满足方程组：

$$\begin{cases} kx = 30cN \\ k(x + 2\lambda) = 45cN \end{cases} \xrightarrow{\text{解得}} \begin{cases} k = \frac{7.5}{\lambda} (cN/mm) \\ x = 4\lambda (mm) \end{cases}$$

由上式可知，因为弹性系数 k 的变化，弹簧总长将会缩短为原先的 λ 倍。而能够缩短的轴体高度便是初始状态下未被压缩的弹簧高度：

$$\begin{aligned} \Delta H &= h - x = 8.5mm - (12.5\lambda - 4\lambda) = 8.5(1 - \lambda) \text{ mm} \\ \frac{\Delta H}{H} &= \frac{8.5(1 - \lambda)mm}{18.5mm} = \frac{17}{37}(1 - \lambda) \end{aligned}$$

若想要充分利用所牺牲的全键程，则整个轴体所缩小的高度比值应当大于全键程缩短的长度比值。即 $\frac{\Delta H}{H} \geq \lambda$ ，由此可列式：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H}{H} &\geq \lambda \\ \frac{17}{37}(1 - \lambda) &\geq \lambda \\ 17 &\geq 54\lambda \\ \lambda &\leq \frac{17}{54} \approx 0.315 \end{aligned}$$

为达到最佳的效果，我们取 λ 的最大值 0.315 进行后续计算。此时，弹簧整体长度和轴体高度都有所下降：

$$\begin{aligned} X_{\min} &= (1 - \lambda_{\max})X = 8.5625mm \\ h_{\min} &= (1 - \lambda_{\max})h = 5.8225mm \\ \Delta h_{\max} &= h - h_{\min} = 2.6775mm \end{aligned}$$

但相应的，做出轴体高度下降的代价是缩短了轴体的全键程。根据 λ 可计算出缩短的键程：

$$\begin{aligned} \Delta A_{tl_{\max}} &= \lambda \times 4mm = 1.26mm \\ \Delta P_{tl_{\max}} &= \lambda \times 2mm = 0.63mm \end{aligned}$$

对于如此显著的键程差异，消费者可以通过手指的按压明显感受到。虽然相较于 TTC 薄型轴体 1.6mm~2.5mm 的全键程来说，与传统键程差异较小。但在实际生产过程中，还是可以适当缩小 λ 的数值，以生产出拥有更好手感的轴体。

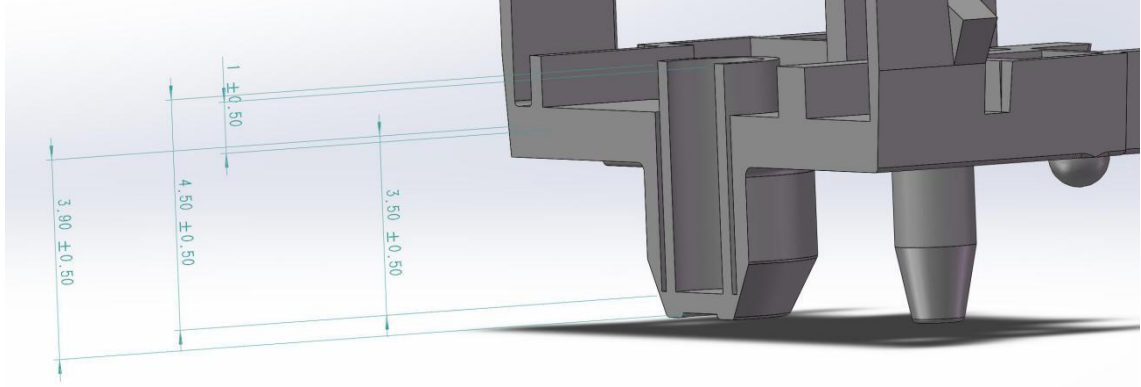


图 24 轴体下盖尺寸说明

但实际上并没有如此理想化，又有新的问题随之出现。

由之前算式可知，全键程的变化量为 1.26mm，则现有全键程为 2.74mm，也就是说，在弹簧裸露长度 5.82mm 被按压 2.74mm 后，只剩余 3.08mm 的裸露量。而对于现有轴体底盖来说，弹簧最多被压缩至 4.5mm 的长度，之后就会被空心圆柱体所阻碍。（图表 24）由于此原因，弹簧缩短值应当同时对手感与轴体底盖做出妥协，将按压至底时的弹簧剩余裸露量提高至 3.5mm，根据算式可计算此时的 λ 值：

$$(1 - \lambda)(h - 4mm) = 3.5mm$$

$$(1 - \lambda) \times 4.5mm = 3.5mm$$

$$\lambda = 1 - \frac{3.5mm}{4.5mm} = \frac{2}{9} \approx 0.22$$

则此时的触发键程与全键程为：

$$Atl = (1 - \lambda)Atl_0 = 0.78 \times 4mm = 3.12mm$$

$$Ptl = (1 - \lambda)Ptl_0 = 0.78 \times 2mm = 1.56mm$$

$$\Delta h = \lambda h_0 = 1.87mm$$

$$h - Atl = (1 - \lambda)h_0 - Atl = 0.78 \times 8.5mm - 3.12mm = 3.51mm$$

此时键盘裸露长度为 3.51mm，如果我们忽视 0.01mm 数量级上的误差，那么这种情况下，当把键盘按压至底部后，轴芯的内凹圆柱表面会与轴体底盖上的空心圆柱体接触，从而停止按压过程。而要达到这种效果，则需要对轴芯的形状进行进一步的改变。

（三）降低键帽高度并将键帽下移

在日常使用操作中，消费者所观察到的笔记本所搭载的键盘样式与外接键盘的样式明显不同。笔记本因为便携性压缩了键盘所占据的空间，使得笔记本键盘的键帽逐渐向扁平化与一体化演变。

由此可见，将原有的机械键盘键帽布局向扁平化改变，是在缩短轴体高度上必须要做的工作，而此项工作必然是从轴芯入手。（图表 25）

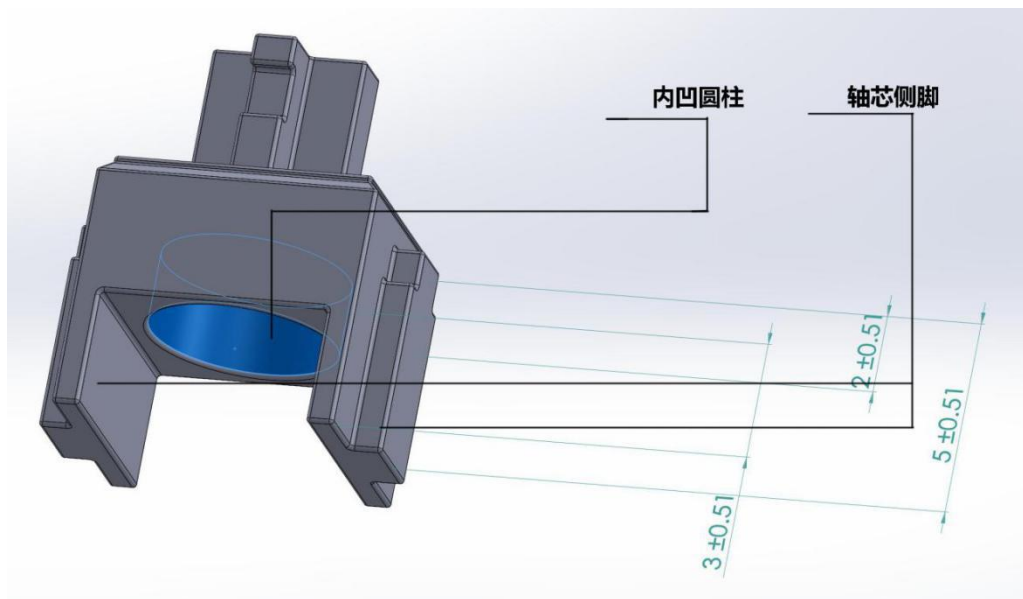


图 25 轴芯尺寸说明

经过之前的两次降低高度，轴芯的两个底脚的高度必然要降低，使得其不会干扰到轴芯的下落。但首先，应先缩小内凹圆柱的深度，使其的深度缩小至 1mm。

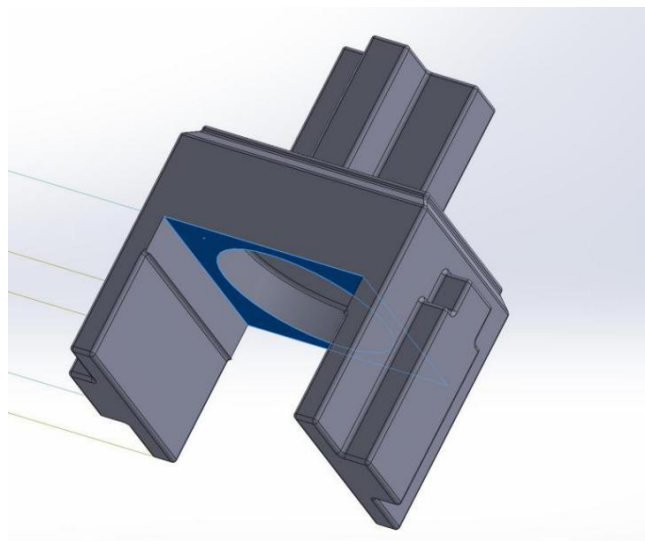


图 26 轴芯操作示意图 1

将内凹圆柱的深度更改为 1mm 后，更改后的 3D 建模如上图所示。（图 26）当轴芯下移至底部时，上图所重点标出平面将与轴体底盖上表面接触，内凹圆柱表面将与轴体底盖空心圆柱体上部接触。在误差较小的情况下，可以看做是与轴体下盖相契合的。目前的问题在于如何处理轴芯两侧的侧脚。

首先想到的办法是直接将轴芯的侧脚移除。但通过分析轴芯与轴体上盖的位置关系可以得知，轴芯的两个侧脚主要起到了约束轴芯移动方向的作用。如果单纯地将轴脚移除，那么则需要相应地更改轴体上盖的形状，使之仍旧能契合轴芯，并能约束轴芯的水平移动，这显然是需要更多工作量的。

由于上述原因，更合理的处理方法应该是仍旧保持一定高度的轴脚，使得轴脚仍旧能够被约束在轴体内部侧壁上。但仍需要使得轴芯下移至最底端过程中，轴脚不妨碍轴芯的竖直运动。为了达成这个目的，将轴体下盖底部挖出 0.5mm 深的凹槽，并将轴芯侧脚相应缩短（图 27）：

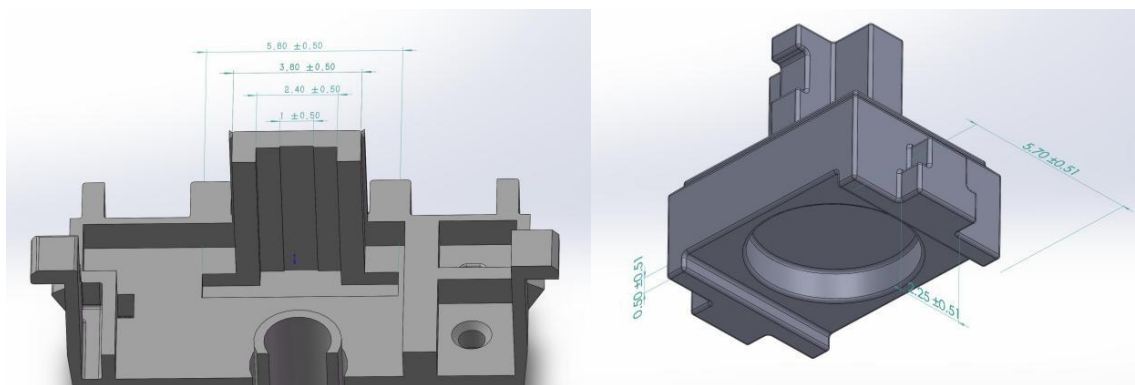


图 27 轴芯操作示意图 2

其次，鉴于笔记本键帽偏平的特殊性，可以将上方十字接口缩短一定的长度——长度只要能够能够保证按键成功按下，即大于 AtI 的 3.12mm 即可。

四、效果分析

经过对于以上三种方案的分析，我们发现三种方案都可以相对有效地缩小轴体的高度。但三种方案在优缺点上和对于轴体的有效高度缩短上各有不同。

第一种方案的核心思路是降低轴体内部弹簧的初始位置。这种方案的优点是不会缩短弹簧的有效键程，可以在完全不改变轴体手感的前提下缩短轴体高度。但缺点是在轴体下部圆柱体内挖出半径为 1.5mm 的圆环，将增加对于制作工艺的需求并相应地提高制作成本。

第二种方案的核心思路是缩短弹簧的长度。这种方案的优点是能够有效地缩短轴体的高度，且此方案可以选取合适的弹簧长度，使得其与第一种方案同时进行。但缺点是这种方案不可避免地改变了键盘原有的全键程和有效键程，在键盘的手感方面有所牺牲。

第三种方案的核心思路是更改轴芯的形状使其能够贴合更改后的轴体外壳。第三种方案的出现可以说是方案一和方案二实施以后的必然结果。而方案三同时还能够继续降低一定的轴体高度，可以说是锦上添花的一个方案。

经过作图分析，发现三种方案完全可以同时实现：

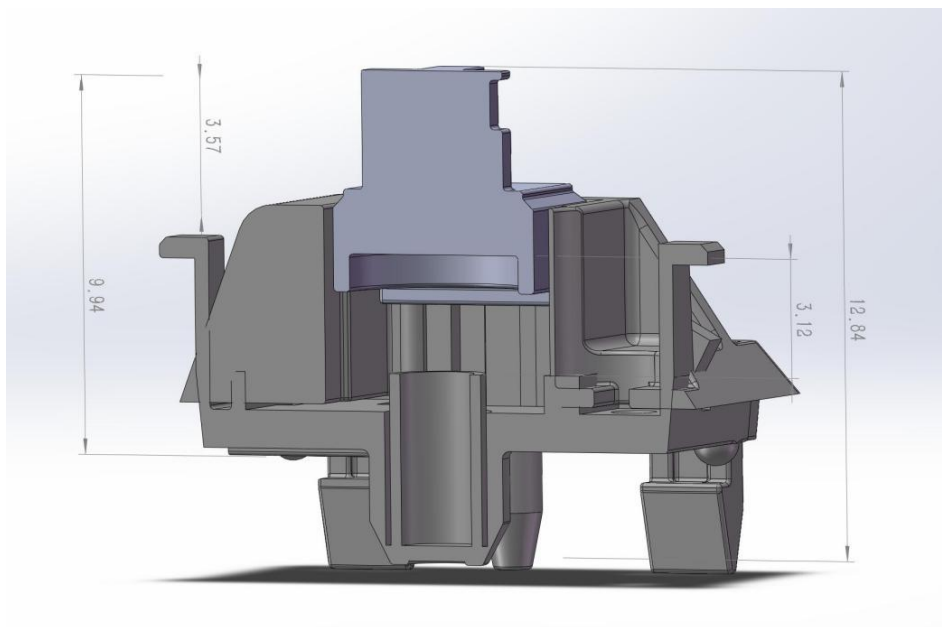


图 28 最终效果剖视图

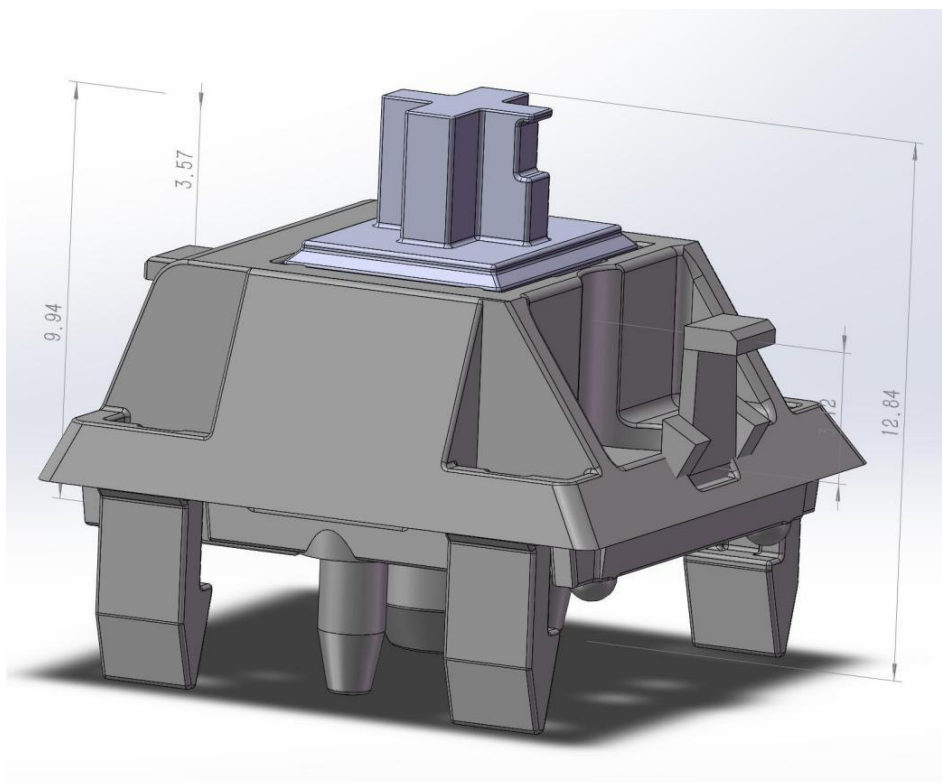


图 29 最终效果整体图示

以上两张图片为最终建模结果，第一张为剖视图（图 28），第二张为正常视图（图 29）。由图中数据可以得出，经过压缩后的轴体，从轴体最底部至轴芯的顶点高度为 12.84mm，位于 PCB 板上方的高度为 9.94mm，轴芯上方为了保持按键正常按下而需要显露出的部分为 3.57mm。

在笔记本的设计中，需要考虑到键帽的高度。但键帽可以选择轻薄类型，使得轴芯上方部位增添的高度可以忽略不计。如此一来，整个笔记本设计过程中，纵向需要为键盘而腾出的空间至多可为 13mm。

相较于原先机械键盘排布的 21.18mm~27mm 的整体高度，此款薄型轴体在以往的基础上降低了 38.6%~51.9% 的总体高度，缩短轴体高度的效果十分明显。

值得一提的是，此款薄型轴体仍旧有空间安插 LED 灯泡与其他应用硬件。而在一般的笔记本电脑上，触摸板、键盘背光灯和各种装饰用灯、开关、Touch Bar 等应用硬件都需要在面板下进行 PCB 板的布设，这些设备原本就是需要占用一定的空间的。再考虑到原本的薄膜键盘所需要的空间，此款基于 PCB 板进行布设的薄型机械键盘轴并不需要占用过多的竖直高度。虽然高度相较于 TTC 的薄型机械轴仍旧略显偏高，但此款机械轴并没有像 TTC 薄型机械轴那样舍弃过多的手感。

五、发展前景

人们对游戏型笔记本和机械键盘的关注程度都在以极快的速度发展。从 2016-2017 年笔记本电脑发展的趋势，以及人们对机械键盘的关注程度中，我们可以轻易地得出结论：未来的笔记本电脑行业市场，游戏型笔记本电脑与机械键盘的结合拥有良好的发展前景。

而两大笔记本厂商在近期推出的产品，都不约而同地尝试将笔记本与机械键盘结合，也正证明了生产厂商对此发展方向前景的看好。

机械键盘广受关注度原因，就在于它的长键程带来的突出手感。而只有一款保留了机械键盘原有手感的机械轴，才能称之为成功的移植产品。此款薄型机械轴能够在占用很小空间的前提下，尽可能地还原机械键盘应当具有的手感。相较于市场上存在的两款顾此失彼的产品来说，此款机械轴更好地融合了手感与便携性，能够更为成功地在便携式平台上展现机械键盘的光芒。

此外，此款机械轴还能体现出机械键盘之间的兼容性。在一个轴体出现故障后，能够轻松地更换轴体或修理 PCB 板，为台式机和笔记本电脑的交互创造了更多的可能性。

结论

由对近几年笔记本电脑和机械键盘的销售市场调查我们可以知晓，游戏型笔记本电脑与机械键盘的结合必然是潮流所趋。而市面上现有的笔记本电脑与机械键盘的结合产品，缺点都很明显，因为机械键盘的生命力在于其长键程所保持的回馈力度，从而带来的优秀手感。

本文就如何在保持原有键程的前提下，缩短机械键盘轴体的高度设定了三种方案：下移弹簧、缩短弹簧长度与下移轴芯。经过建模模拟，三种方案各有利弊，但都能有效地降低轴体的高度。由于三种方案不互相冲突，所以决定将三种方案共同应用于新型薄型机械键盘轴体上。经过数据分析，压缩后的轴体，从轴体最底部至轴芯的顶点高度为 12.84mm，位于 PCB 板上方的高度为 9.94mm，轴芯上方为了保持按键正常按下而需要显露出的部分为 3.57mm。相较于原先机械键盘排布的 21.18mm~27mm 的整体高度，此款薄型轴体在以往的基础上降低了 38.6%~51.9% 的总体高度，效果十分明显。

由于本款薄型机械键盘轴体仅仅占用 1cm 左右的高度，且 PCB 板上可以安插传统笔记本具有的多媒体硬件设备。使得此款轴体可以在最大限度保持原有机机械键盘键程的前提下，将移植机械键盘于笔记本电脑，且市场前景广阔。

参考文献

- [1]张萌. “互联网+”时代移动智能终端发展建议[J]. 通讯企业管理, 2016, (3)
- [2]沈建苗. 到底值不值? 机械键盘为啥如此昂贵[J]. 计算机与网络, 2009, (6)
- [3]戴振宇. 机械键盘产品消费调查[J]. 电脑迷, 2014, (1)
- [4]张智亮. 看轴选键盘[J]. 电脑迷, 2015, (2)
- [5]张博. 机械键盘改造指南[J]. 电脑爱好者, 2016, (8)
- [6]Steve Ranger. PC 业的未来在哪[J]. 商学院 BMR, 2016, (7)
- [7]张磊. 键盘结构编年史[J]. 电脑爱好者, 2012, (8)
- [8]楚杰. 电脑市场情况调查报告[EB/OL]. <http://yjbys.com/diaochabaogao/928869.html>, 2016-01-05
- [9]王彦恩. 2015-2016 年中国笔记本电脑市场研究年度报告[EB/OL]. <http://tech.hexun.com/2016-01-07/181655122.html>, 2016-01-07
- [10]蔡桑珊. 2016 年 1 月中国笔记本电脑市场研究报告[EB/OL]. http://zdc.zol.com.cn/567/5674868_all.html, 2016-02-05