

国内外电子衡器结构创新与应用分析

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】任何电子衡器都是以用户需要为基础，以市场竞争为导向，并依赖于精心设计与制造而发展起来的。本文在分析了近些年来一些电子衡器脱离传统结构设计方法，向着小型化、轻型化、模块化、集成化方向发展与应用的基础上，介绍了模块化拼装结构电子汽车衡、工业轴重秤；集成化称重轨、称重板、称重钩、称重环；部分集成化电子汽车衡、电子吊钩秤；轻型化薄壁型钢结构电子称重梁、电子平台秤；特种用途的承载器可伸缩型电子秤、分体式滚动圆捆纸张电子秤。重点介绍了国内较少设计与应用的空心闭合截面薄壁型钢结构承载器的设计与计算。

【关键词】电子衡器；承载器；模块化；集成化；轻型化；空心闭合截面；薄壁型钢

一、概述

承载器、称重传感器、称重仪表是电子衡器的三大基础部件，其中承载器结构的科学性、合理性是电子衡器准确度、稳定性和可靠性的重要保证。在电子衡器市场日益国际化的今天，电子衡器结构的改进与创新，必然以用户的需要和市场竞争为导向，受新技术、新材料、新工艺的强力牵引。进入 21 世纪以来，随着科学技术的进步，工业过程自动化、智能化水平的提高，各行业对所用电子衡器的结构、功能和性能提出了许多新要求，其中对承载器最主要的要求就是小型化、轻型化、模块化和集成化。如果设计电子衡器还是按照传统的承载器、称重传感器、承力传力构件、定位限位装置等零部件组装式结构方向发展，不但满足不了用户的新需求，而且自身的发展也会越来越困难。在现有承载器结构的基础上，为了提高技术性能和满足用户的某些新要求，就是进行一些小小的改进，也要用比较高的代价才能实现。正如 20 世纪 90 年代德国衡器专家所评述的“这种零部件组装式承载器结构设计几乎走到了尽头”。因为零部件组装式承载器结构一般都有高大笨重、零部件多、活动环节多、安装调试时间长、稳定性和可靠性差、

生产效率低和成本高等缺点。因此德国衡器专家提出：“在进行承载器结构设计时，尽量脱离传统结构的束缚，大胆寻求另外一种发展方向，即向着减小尺寸，减少零部件，节省空间，有利于实现最佳化生产，提高效率，降低成本等方向发展”。基于这种认识，国内外一些电子衡器制造公司对承载器结构进行了许多研究工作，其共同的研发方向和创新点就是变零部件组装式承载器结构，为模块化、部分集成化和集成化承载器结构。先后研发出模块化电子汽车衡、便于运输的小模块拼装型电子汽车衡；部分集成化的承力传力、定位限位装置一体化电子汽车衡、电子吊秤；集成化称重轨动态电子轨道衡、集成化剪切、弯曲板型动态公路车辆轴重秤、集成化电子称重环；空心闭合截面薄壁型钢结构电子称重梁、“竹排”式薄壁型钢结构电子平台秤；特种用途的承载器可伸缩型电子秤、分体式滚动圆捆纸张电子秤等。

二、模块化电子衡器

1. 模块化电子汽车衡

早在 20 世纪 90 年代，梅特勒—托利多（常州）称重设备系统有限公司，在国内首先实现了模块化电子汽车衡设计与生产。设计人员将正交各向异性桥梁设计理论应用在模块化承载器设计中，并对其进行了适当简化，将纵梁和主梁合二为一，成为封闭结构的“U”型钢，再将底梁简化成端板，在端板上完成模块间的搭接和称重传感器的过渡支撑，整个承载器模块仅由“U”型钢、面板和端板组成。

所谓模块化承载器，就是根据载重汽车及拖车长度和额定承载量，设计制造出几种标准的模块化承载器，根据用户对承载器尺寸要求，将两块或两块以上模块任意搭接而组成各种规格的电子汽车衡。例如根据载重汽车长度 $\leq 12\text{m}$ ，牵引车、拖半挂车长度 $\leq 16\text{m}$ ，汽车拖挂车长度 $\leq 20\text{m}$ ，选择模块化承载器的单元长度系列为 5m、6m 和 7m，优选宽度系列为 3m 和 3.3m。每种不同宽度和不同长度系列的单块、2 块、3 块和 4 块模块，可组合成 5~28m 长的 22 种尺寸规格的承载器，从其中选出十几种常用的承载器长度作为优选的标准系列即可。这种模块化电子汽车衡不但增强了产品的通用性和互换性，而且也较大的提高了生产效率和产品质量，特别适合规模化和自动化生产。

2. 承载器为小模块拼装型电子汽车衡

电子汽车衡承载器结构的模块化、标准化和系列化，既有利于规模化、自动化生产，又便于移动和运输。美国 FIRST 衡器制造公司研发出小模块拼装型承载器的大型电子汽车衡。与模块化电子汽车衡不同之处是：前者单节承载器模块为一整体结构，后者为方

便运输将单节承载器模块一分为二，由两个小模块并联组装而成，再根据不同的尺寸要求将并联而成的单节模块串联成电子汽车衡的承载器。小模块之间的连接是通过模块上具有足够强度的若干个支脚相互吻合后用螺钉固紧。一般小承载模块由 4 根“U”型钢或槽钢做纵向主梁，在端部横梁上焊接有 5 个串联支脚，一个定位支板，在侧面主梁上焊接有并联支脚。因受力不同，两种支脚的结构也不相同。其小模块承载器结构示意图如图 1 所示。

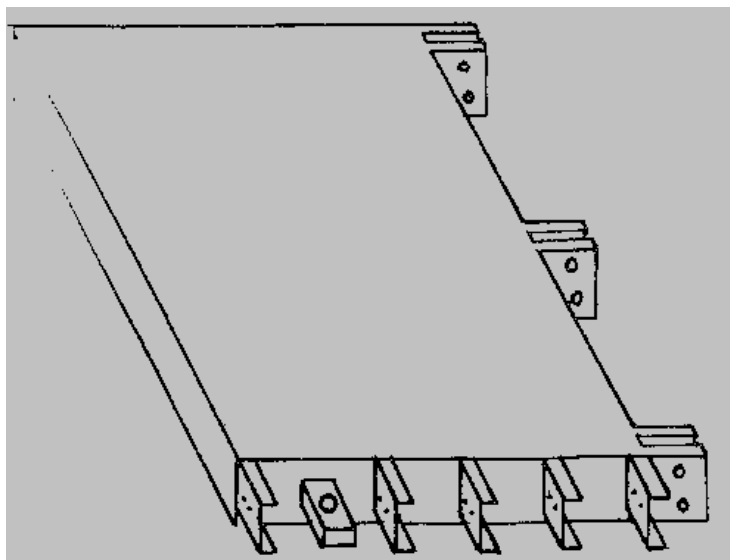


图 1 承载器小模块结构示意图

3. 模块化工业轴重秤

为满足工矿企业物料转运，内部结算等需要，美国 SI / Allegany 公司研发出可称量不同车型轴重、轴组重进而给出整车重量的模块化工业轴重秤。其承载器的宽度与集成化称重板相同，为双轮胎宽度的 1.5 倍（750mm 左右），长度为车型的三连轴长度和称重仪表采样时间内车辆行驶距离之和，一般为 1600mm 左右。选择不同长度的模块化承载板与安装有悬臂梁型称重传感器的盒段式称重梁搭接，就形成了可以称量轴重、轴组重和整车重量的工业轴重秤。因为模块化轴重秤承载器较长，为使其具有足够的刚度和较低的外形尺寸，在设计中多采用两节模块化承载板搭接在低外形盒段式称重梁上的结构，模块化承载板为带筋条加强的花纹钢板，连接在承载器两端的斜面引桥也由花纹钢板焊接而成。美国 SI / Allegany 公司模块化工业轴重秤的结构示意图如图 2 所示。

此种模块化工业轴重秤的特点是：结构简单，高度低，重量轻，便于安装携带；承载模板与称重梁搭接，活动环节少，刚度大，称量准确度高；承载模板、盒段式称重梁、斜面引桥均可按模块化设计，进行标准化、系列化生产。

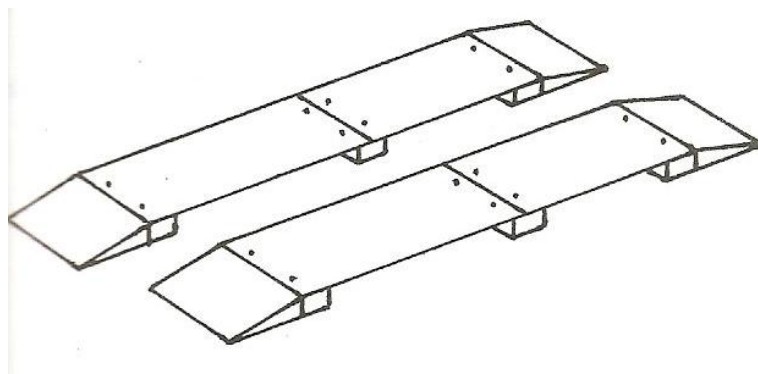


图2 美国 SI / Allegany 公司模块化工业轴重秤结构示意图

三、集成化电子衡器

1. 集成化称重轨

20 世纪 80 年代，欧美一些电子测量公司和电子衡器制造企业，为满足铁路运输、钢铁冶金、煤矿电厂、港口码头等部门物料及转运货物的称量、超载、欠载、偏载检查、制动力测量等需要，开发出称重轨（Weigh Rail），即取下线路的一小段钢轨并在其上粘贴电阻应变计，使称重传感器、钢轨承载器一体化，具备动态电子轨道衡的功能，达到快速称量的目的。以美国工程师 Ned Sneed 发明的集成化弯曲型称重轨最具代表性，他在深入分析两个轨枕之间的钢轨受力变形机理后，得出在称量段钢轨底部粘贴四片单轴电阻应变计，当车轮通过时，四片电阻应变计输出的总和等于内侧 2 片电阻应变计输出之和减去外侧 2 片电阻应变计输出之和，也就是说当车轮行驶过钢轨称量段时，4 片电阻应变计的输出总和为一常数，只要测出此输出值，就可以准确的转换出车辆的载重量。尽管称重轨可以用冷焊方法或用鱼尾板与线路连接为一体，减少了车辆振动，可提高称量准确度，但称量段的跨度较大，挠度也较大，安全性有所降低。钢轨底面只能打磨不能加工，因而弯曲型称重轨输出灵敏度较低，以轮重 15t 为例，灵敏度只有 $0.25\text{mV} / \text{V}$ 。

20 世纪 90 年代以来，集成化称重轨动态电子轨道衡的研究在弯曲型结构的基础上发展为剪切型结构。它是在与线路钢轨完全一样的一段钢轨的腹板上，直接加工出与双剪梁型称重传感器基本相同的应变区，并在盲孔内粘贴双剪切电阻应变计，完全按称重传感器制造工艺进行布线、组桥、电路补偿、防护密封、性能检测，使此段钢轨与称重传感器一体化，形成剪切型称重轨。美国 KILO-WATE 公司，德国 PFISTER 公司、GTM 公司均有 1.8m 长的剪切型称重轨，称量准确度均优于 0.5 级。剪切型称重轨的力学模型及剪力图如图 3 所示。

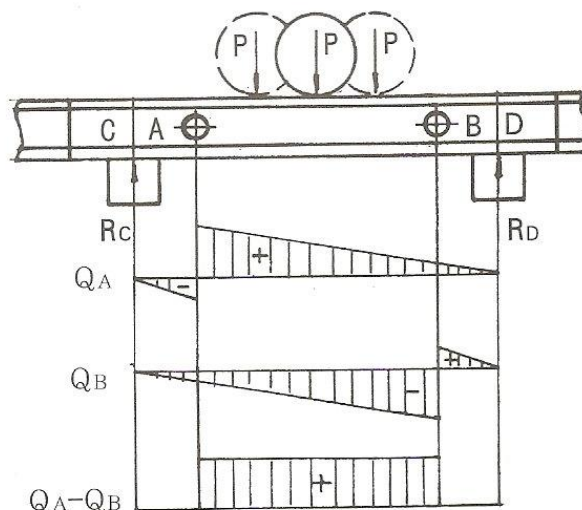


图3 称重轨的力学模型及剪力图

我国北京傲邦达技术开发中心针对 1.8m 称重轨只有一个称量段的不足，经过理论分析和反复试验研制出 7.5m 长的称重轨动态电子轨道衡。独创以数字求和方法为基础的单轴、双轴、多轴多次称重计量的数学模型，克服车辆行驶过程中轴间重量转移带入的误差。将单次轴计量改为 6 次轴计量，并适当延长有效单轴计量长度，同样通过冷焊技术或用鱼尾板与两端的线路连接，实现钢轨与称重传感器一体化，形成不断轨动态电子轨道衡，其动态称量准确度优于 0.5 级。

称重轨动态电子轨道衡一般都附带一台静态自校装置，便于初次安装或使用中检查。静态自校装置是利用龙门架结构的自身平衡原理，通过安装在龙门架上的油压加载系统和标准称重传感器实现对称重轨进行各级加载。称重轨电子轨道衡静态自校装置结构示意图如图 4 所示。

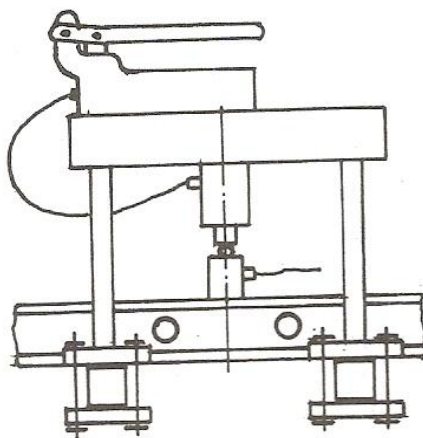


图4 称重轨电子轨道衡静态自校装置结构示意图

2. 集成化称重板

早在 20 世纪 60 年代末期，美国各州公路工作者协会（AASHO）经试验研究提出了车辆轴重对公路路面破坏的“四次方法则”，即

$$D = \left(\frac{W}{W_0} \right)^4$$

式中：D—相对于标准载荷，车辆实际轴载质量对公路的破坏作用系数；

W—车辆的实际轴载质量；

W₀—车辆的标准轴载质量。

例如一高速公路设计的标准轴载质量为 W₀=10t，车辆按此标准行驶，即 W=W₀=10t，则 D=1，对公路无破坏作用。当车辆的实际轴载质量 W=12t 时，D=2.0736；当 W=16t 时，D=6.5536。当车辆的实际轴载质量增加一倍时，即 W=20t 时，D=16，可见公路车辆轴载质量超限时，对公路破坏作用的严重性。因此，世界各国都对行驶在公路上车辆的轴载质量进行限制和检查，对此世界各国都是通过限制轴重来控制和治理公路车辆轴载超限，我国、英国、德国、荷兰、巴西等国限定公路车辆标准轴载质量为 10t，法国、西班牙、伊朗等国限定标准轴载质量为 13t。这种检测车辆轴载质量的设备就是公路车辆动态轴重秤。目前，世界各国应用较多的是集成化结构的称重板（Weighpad）型轴重秤。美国 Amcells 公司、Intercomp 公司，英国 Trevor Deakin，德国 Mikros Systems 公司、GTM 公司、Pfister 公司，加拿大 Mass Load 公司等先后研发出称重板型动态轴重秤。以英国 Trevor Deakin 公司的剪切型称重板和德国 PAT 公司的弯曲型称重板最具代表性，其剪切型称重板的结构和弯曲型称重板的安装图如图 5、图 6 所示。

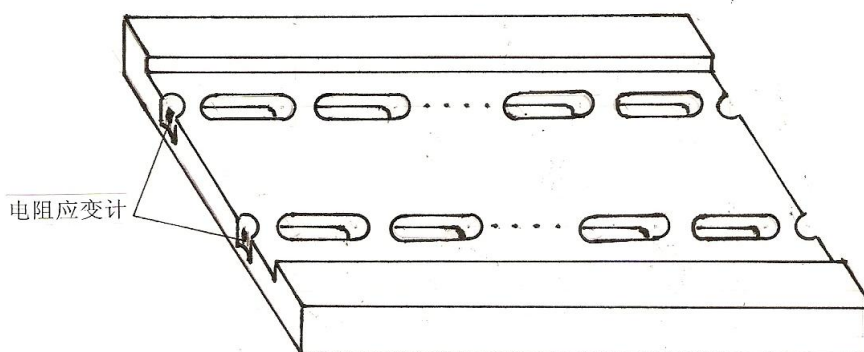


图 5 剪切型称重板结构示意图

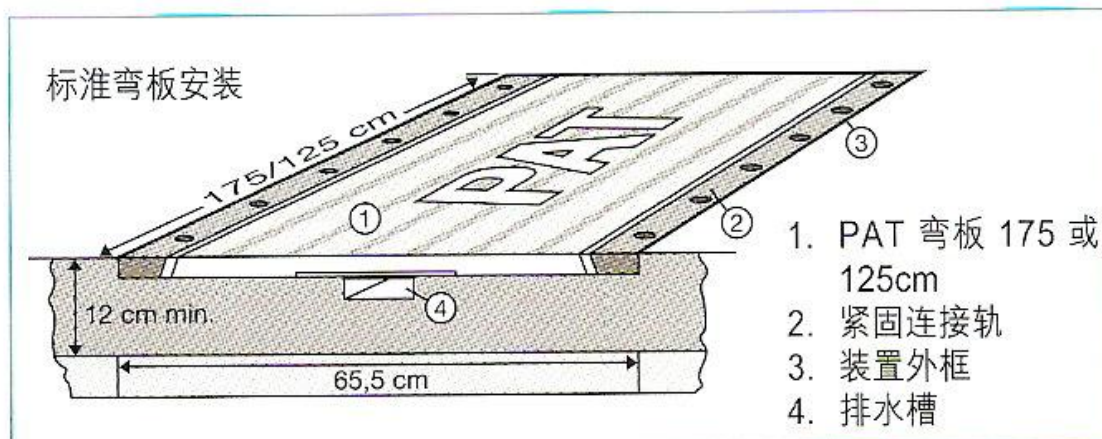


图 6 德国 PAT 公司弯曲型称重板结构及安装图

剪切和弯曲型称重板式轴重秤的主要特点是：

（1）承载器、支撑、称重传感器合三为一，形成一个集成化的整体结构，剪切型称重板采用硬铝合金制造，弯曲型称重板采用塑料模具钢制造，体现了承载器结构紧凑、高度低、重量轻的发展方向，一般高度为 2.5cm 左右。尺寸为 175cm×50.8cm×2.3cm 和 125cm×50.8cm×2.3cm 的弯曲型称重板的重量分别为 114kg 和 81kg；硬铝合金剪切型称重板的重量只有 30kg 左右。

（2）剪切型、弯曲型称重板本身就是一个大型板式称重传感器，完全按照称重传感器制造工艺进行粘贴电阻应变计、布线组桥、电路补偿与调整。为适应较为恶劣的工作环境，采用多层密封技术，即在长盲槽内实施聚氨酯灌密封胶密封后，再将整个称重板进行硫化橡胶密封，具有极高的防潮、防水、防盐雾、防腐蚀、防冻能力。

（3）通过合理选择粘贴电阻应变计位置，布线组桥、偏心载荷调整，提高了称重板抗偏心载荷能力。

（4）由于称重板为集成化结构，无任何活动环节和相互摩擦部件，抗振动、冲击能力强，减少了动态测量时由各种谐波组成的动态分量，工作可靠性高、稳定性好。

3. 集成化称重钩

集成化称重钩型电子吊秤，是将传统电子吊秤的吊环、秤体、称重传感器和吊钩合四为一，形成一个整体结构。即在单剪切梁型称重传感器的两端，分别加工出反对称的吊环和吊钩，使其成为一个较大的 S 型称重传感器，国外称其为称重钩。其受力形式、计量性能与普通 S 型称重传感器完全相同。专用的小型化称重显示控制仪表、无线发射装置与天线就安装在称重钩的电路补偿与调整盒一侧。通过控制反对称的吊环与吊钩尺

寸，实现钩体与称重显示控制仪表的平衡。吊环与吊钩的根部，即剪切梁称重传感器的两端应有足够的刚度，保证应变区为纯剪切应力状态。集成化称重钩型电子吊秤的结构示意图如图 7 所示。

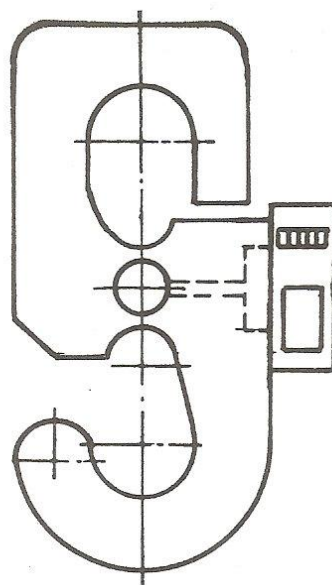


图 7 集成化称重钩型电子吊秤

称重钩型电子吊秤的特点是：结构紧凑，体积小，高度低，重量轻，便于安装、携带；吊环、吊钩和称重传感器为一整体结构，可以加工出较高的同轴度等级，加载同心度好，偏心误差小；称重钩本身就是一个完整的称重传感器，无其它活动环节，称量准确度高、稳定性好。

4. 集成化称重环

集成化称重环型电子吊秤与称重钩设计思路基本相同，同样将传统电子吊秤的吊环、秤体、称重传感器和吊钩合四为一，形成一个整体结构。不同之处是称重环利用的是桥式双剪切梁型称重传感器，并使双剪切梁型称重传感器与吊钩形成一个闭合环。与称重钩相比增大了吊钩的刚度，使结构更加对称合理，提高了测量的准确度和稳定性。其缺点是没有直接形成吊环，而是形成一个吊环孔，需要通过一个承受拉向载荷的马蹄环和承受剪切力的销钉才能完成起吊称重计量任务。因称重环本身就是一个完整的双剪切梁型称重传感器，可以完全按称重传感器制造工艺规程进行生产，保证了称量的准确度和可靠性，称重环结构简图如图 8 所示。

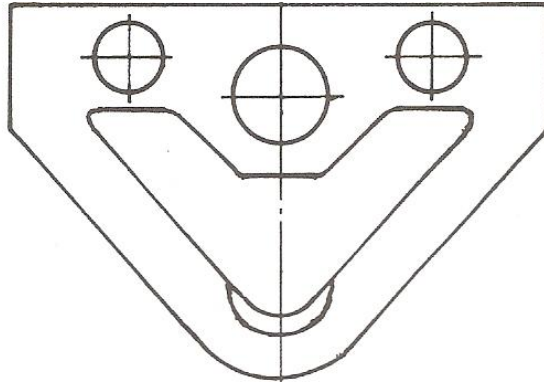


图8 集成化称重环

加拿大 Mass Load 公司集成化称重环的主要技术指标为：额定量程 100001b；灵敏度 $2\text{mV} / \text{V}$ ；非线性 $<0.03\%FS$ ；滞后 $<0.02\%FS$ ；重复性 $<0.01\%FS$ ；零点温度影响 $<0.015\%FS / 10^{\circ}\text{C}$ ；灵敏度温度影响 $<0.008\%ES / 10^{\circ}\text{C}$ 。

四、部分集成化电子衡器

不是所有电子衡器的承载器都能设计为集成化结构，对于那些承载器尺寸较大或结构较为复杂的电子衡器，可以采用部分集成化结构设计。例如在承载器的局部使称重传感器与承力传力、定位限位装置一体化；称重传感器与承载器的承力支撑一体化；称重传感器与电子吊秤承载外壳一体化等。

1. 称重传感器与承力传力定位限位装置一体化的电子汽车衡

由于电子汽车衡在称重计量时必须容纳整辆汽车及拖车，所以其承载器的体积和台面尺寸都很大，不可能象称重板那样进行承载器、支撑和称重传感器合三为一的一体化设计。在称重传感器与承载器连接处，必须设计较为复杂的承力传力、定位限位装置，才能完成称重计量任务。传统的设计方法归纳起来主要有三种类型：其一为采用双剪梁型称重传感器顶球式支撑，即利用称重传感器上的 3 英寸钢球支撑承载器传递载荷，必须附加承载器的纵向和横向限位装置。其二是采用自动定心承力传力定位限位的双球面摇摆支柱组件，其结构可视为将钢球拉长形成的一根双球面摇摆支柱组件，由双球面摇柱、O 形橡胶密封圈、圆筒形底座、聚四氟乙烯板组成。通过合理选择球面半径、双球面摇柱高度与直径等尺寸参数来控制承载器限位间隙量，达到限制承载器纵向、横向运动的目的。其三是称重传感器弹性元件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置，就是将称重传感器的弹性元件与双球面摇柱合二为一，设计成为一个整体结构，即是称重传感器的敏感元件，又起到双球面摇柱自动定心承力传力限位作用。上述方案的缺点是零部件多，制造和装配的不一致性，连接件之间的摩擦和位移都可以引起非线性和离散

性，很难保证电子汽车衡在使用过程中“承载器受力分配系数”恒定不变。

解决上述问题的最佳设计就是将称重传感器与承载器的承力传力、定位限位装置集成为一个组件，就大型承载器而言为部分集成化设计。以加拿大 MASS LOAD 公司的线接触链环组件承力传力定位限位装置和美国 RICE LAKE 公司的线接触马鞍环组件承力传力定位限位装置最具代表性。线接触的链环组件或马鞍环组件引入传递载荷时，均能有效地克服承载器的水平力，实现自动平衡定位限位，保证电子汽车衡在使用过程中“承载器受力分配系数”恒定不变。前者要求称重传感器中间固支两端为悬臂剪切梁式结构，两个线接触的链环分别悬挂在双悬臂剪切梁的两端，四只称重传感器八个链环共同支撑承载器，起到承力传力定位限位作用；后者要求双剪梁型称重传感器两端为固定支撑，剪切梁中间悬挂一个线接触的马鞍环，并与承载器相连接起到承力传力定位限位作用，为单链环平移和旋转结构，不存在两个链环同步问题。加拿大 MASS LOAD 公司的线接触链环组件如图 9 所示，美国 RICE LAKE 公司的线接触马鞍环组件如图 10 所示。

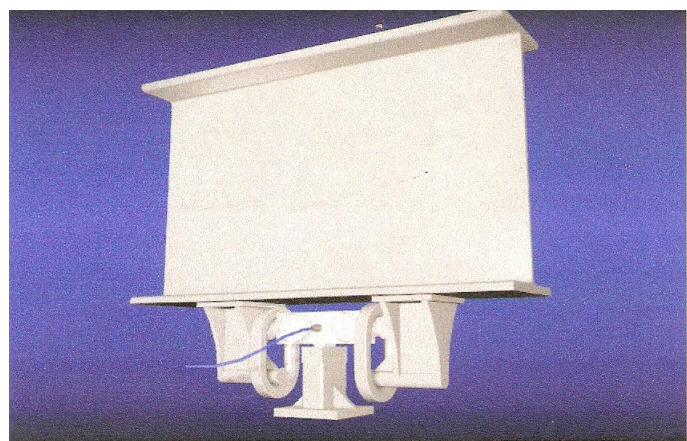


图 9 加拿大 MASS LOAD 公司的线接触链环组件

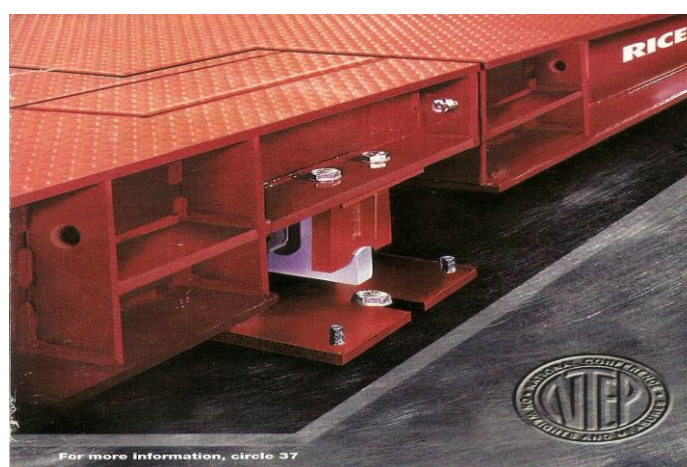


图 10 美国 RICE LAKE 公司的线接触马鞍环组件

大型电子汽车衡的承载器通过部分集成化设计，将复杂的承力传力、定位限位装置与称重传感器集成为线接触的链环或马鞍环组件，其突出的特点是：

（1）结构简单紧凑，与称重传感器和承载器连接合理，为无摩擦载荷传递，可采用铸钢件，冷热加工方便，成本低，特别适用于大量程的电子汽车衡和电子平台秤；

（2）链环或马鞍环均为线接触悬挂式柔性承力传力方式，对承载器受载后的变形和温度变化引起的热胀冷缩变形具有自动调整和适应能力；

（3）与链环或马鞍环配套的双剪切梁型称重传感器，其加载点与支撑点自成平衡力系，承载器重心低、稳定性好；

（4）在承力传力定位限位过程中，具有多维自由度和全方位位移性能，保证“承载器受力分配系数”恒定不变。

2. 称重传感器与箱式承载器一体化的电子吊秤

部分集成化的电子吊秤是将箱式承载器与称重传感器合二为一，直接采用轴销式剪切梁型称重传感器代替箱式承载器与吊环、吊钩组合形成电子吊秤称量系统。称重显示控制器和电池等安装在吊环上，部分集成化电子吊秤结构示意图如图 11 所示。

部分集成化结构电子吊秤的特点是：结构简单紧凑，零部件少，圆柱面接触配合，摩擦影响小，称量准确度高；秤体高度低，重量轻，便于运输安装调试，使用方便；由于采用圆截工字形截面剪切梁型称重传感器，抗偏心、侧向载荷能力强。

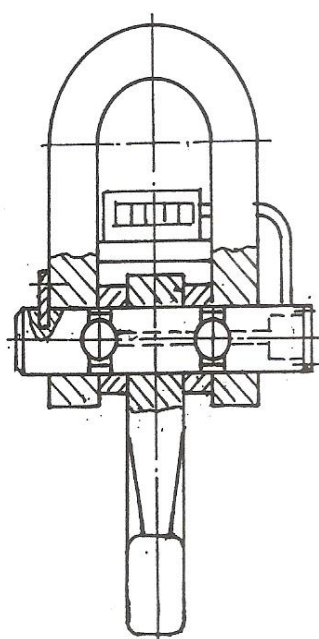


图 11 部分集成化结构的电子吊钩秤

3. 称重传感器与支撑一体化的薄型电子平台秤

为了满足工厂、仓储、物流、商贸等部门的需要，美国 FIRST 衡器制造公司和 RICE LAKE 称重系统公司都研制生产了薄型电子平台秤。其承载器结构完全摆脱了传统的设计方式，或选用空心闭合截面薄壁型钢采用正交叉的“方格”式焊接结构，或是以槽钢的腿宽做为承载器的高度，并将槽钢的两个腿与台面钢板焊接成空心闭合截面盒段的整体焊接结构。后者在国外应用较多，其承载器的框架为四根边槽钢，中心承载部分为井字形排列的槽钢，均采槽钢的两个腿与承载钢板接触，用间断焊接方法将其焊接成为一个整体结构。两者均选用带有圆盘支撑的悬臂剪切梁型称重传感器，其共同特点是即降低了高度，又保证了刚度。

美国 FIRST 衡器制造公司的薄形电子平台秤，悬臂剪切梁型称重传感器安装在承载器四个角上的两个边槽钢之间的间隙处，承载器结构示意图如图 12 所示。

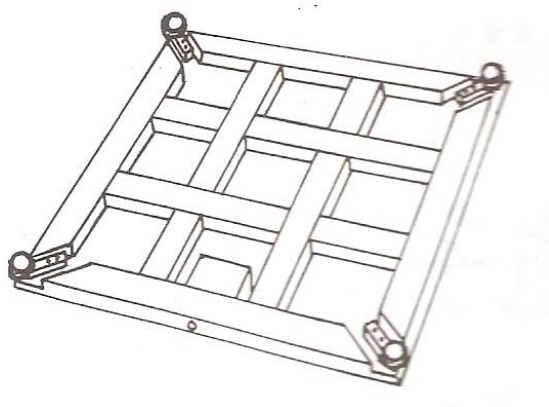


图 12 FIRST 公司电子平台秤结构示意图

美国 RICE LAKE 称重系统公司的薄形电子平台秤，悬臂剪切梁型称重传感器安装在承载器两个边槽钢的两端长方形槽内，使悬臂剪切梁型称重传感器得到很好的保护。承载器总体结构与图 12 基本相同，其悬臂剪切梁型称重传感器安装简图如图 13 所示。

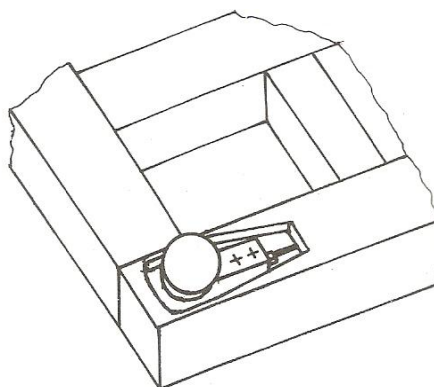


图 13 RICE LAKE 电子平台秤称重传感器安装示意图

两种薄型电子平台秤的共同特点是：结构紧凑，外形低，使用方便；利用槽钢的两个边腿与承载钢板焊接形成空心闭合截面，承载器刚度大，变形小，可靠性高；悬臂剪切梁称重传感器安装在槽钢间隙或长方形槽内，既得到了很好的保护，又降低了平台秤高度，是十分理想的电子平台秤结构。美国 FIRST 衡器制造公司的薄形电子平台秤有普通钢和不锈钢两个系列，额定量程 1000~10000kg，承载器尺寸 610mm×610mm×86mm~1500mm×2100mm×108mm 等五种规格供选用。

五、轻型化电子称重梁与电子平台秤

传统电子平台秤的承载器，多由标准开口截面型钢焊接而成的底部支撑框架和上部承载框架、承载板组成，与称重传感器、承力传力定位限位装置组装后活动环节多，稳定性和可靠性差，是典型的零部件组装式承载器结构，工艺难度较大，不利于实现承载器轻型化和最佳化生产。为突破开口截面型钢焊接框架式承载器结构体积大而笨重，难以实现轻型化的缺点，加拿大 Mass Load 公司研发出利用空心闭合截面薄壁型钢为承载梁、承载器的轻型化电子称重梁和电子平台秤。

1. 轻型化电子称重梁

轻型化电子称重梁（Loadbeams），是由一根空心闭合正方形或长方形截面薄壁型钢和安装在型钢内的带有承力支撑的两个悬臂梁型称重传感器、一个接线盒组成，其结构示意图如图 14 所示。

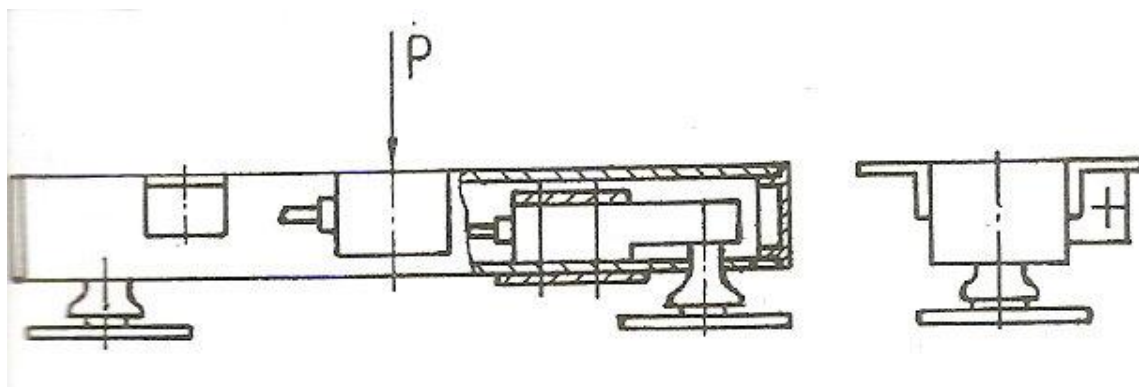


图 14 电子称重梁结构示意图

加拿大 Mass Load 公司此种结构的电子称重梁有三种规格，额定量程为 1135kg、2270kg 和 4540kg，称重梁的长度分别为 559mm、838mm 和 1219mm，称重梁的宽度均为 76.2mm，由支撑底面到梁的顶面高度均为 127mm，两个支撑之间的距离分别为 444.7mm、723.7mm 和 1104.7mm。美国、加拿大电子称重梁所用的空心闭合正方形或长方形截面薄

壁型钢，多为不锈钢或优质钢标准型材。我国可供选择的此类型材有冷弯空心正方形、长方形截面型钢，冷拔无缝方形、矩形截面钢管。

轻型化电子称重梁最突出的特点就是它的可组合性，两根或多根电子称重梁可以组合成不同结构、不同用途的电子衡器。以两根电子称重梁并联为例，在其上固定一个刚度较大的支架，再在支架上安装一个称量斗，就组成一台电子料斗秤，其结构示意图如图 15 所示；在两根前后配置的称重梁上，安装一个带有滚动轮、有倾斜坡度的传输滚道，就组成一台生产线上使用的重量校核秤，其结构示意图如图 16 所示。

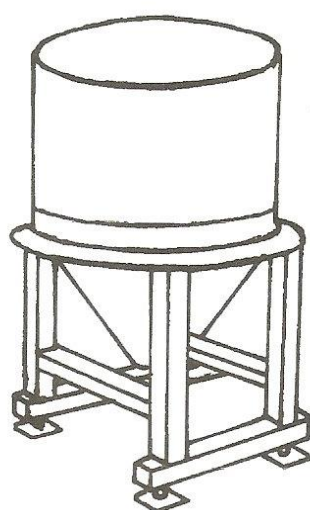


图 15 电子称重梁组成的料斗秤

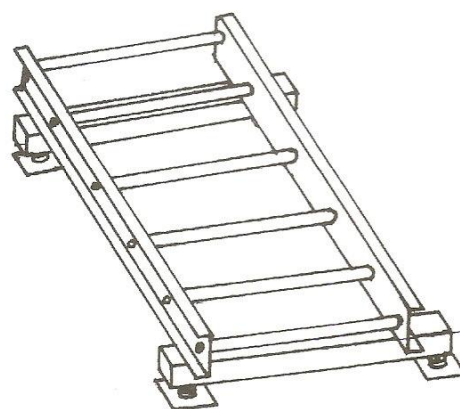


图 16 电子称重梁组成的重量校核秤

2. 轻型化电子平台秤,

轻型化电子平台秤的承载器，由空心闭合截面薄壁型钢和两根称重梁焊接而成，高度低、刚度大、重量轻、可组合性强，是典型的部分集成化结构。一般多采用两种组合形式，其一是空心闭合截面薄壁型钢以并联的“竹排”式排列焊接组成承载器；其二是以正交叉的“方格”式排列焊接组成承载器。不论并联“竹排”式或是正交“方格”式空心闭合截面薄壁型钢结构的承载器，其相对边的两个薄壁型钢，必须采用同型号薄壁型钢制成的带有悬臂剪切梁型称重传感器的称重梁，才能成为完整的轻型化结构电子平台秤。

现以空心闭合截面薄壁型钢并联排列焊接的“竹排”式承载器为例进行结构设计与分析。根据电子平台秤的额定载荷和承载器长宽高尺寸要求，初步选择空心闭合截面薄壁型钢的截面尺寸、型钢长度、型钢根数。通过对承载器的弯曲应力、空心闭合截面薄壁型钢内的剪切应力和最大挠度计算，最后确定空心闭合截面薄壁型钢的尺寸参数。例如要设计一台额定量程为 10t，承载器尺寸为 1000mm×600mm×100mm 的电子平台秤，可

以选择 $120\text{mm} \times 80\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的空心闭合矩形截面型钢，截取 1000mm 长的 3 根，再选择同样截面尺寸参数的 1000mm 长的两根称重梁分列两边，5 根并联排列焊接成一个“竹排”形结构的承载器。焊接完成后再将四个带有圆盘式支撑的悬臂剪切梁型称重传感器，分别安装在称重梁的两端，即组成了一台完整的轻型化电子平台秤，其结构与称重传感器安装位置示意图如图 17 所示。

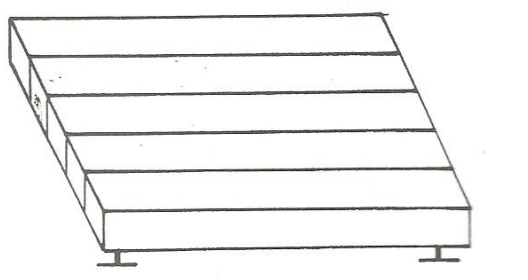


图 17 空心闭合截面薄壁型钢结构电子平台秤

此种轻型化空心闭合截面薄壁型钢结构承载器的特点是：结构简单，工艺性好；高度低、刚度大、重量轻，从结构上保证称重计量性能波动小；部分集成化结构设计减少了许多零部件，使生产技术较大程度的最佳化，提高效率，降低成本；称重传感器与承载器支撑一体化并安装在闭合截面薄壁型钢内，得到了很好的保护，提高了工作的可靠性。

六、特种用途的电子衡器

1. 应用外部环绕支撑的电子衡器

外部环绕支撑实际上就是承载板与称重传感器、承力传力、定位限位装置合为一体的低外形标准称重模块。每一台电子衡器或电子称重系统，可根据额定载荷和承载器尺寸选择 3~6 个外部环绕支撑，组成完整的称重装置。外部环绕支撑广泛的应用于容积秤、料斗秤、大型校核秤和槽型称重设备中。美国 RL 公司外部环绕支撑的额定量程为 $250 \sim 5000\text{lb}$ ($114 \sim 2270\text{kg}$)，其结构示意图如图 18 所示。

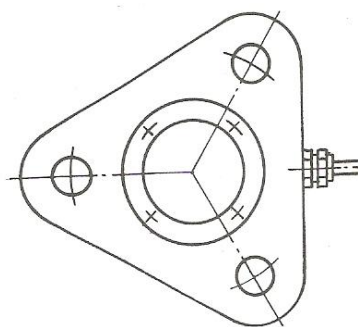


图 18 美国 RL 公司外部环绕支撑结构示意图

2 . 承载器可伸缩的电子秤

法国 Master K 公司研制的承载器可伸缩型便携式电子秤, 采用空心闭合矩形截面铝合金型材做承载器主梁, 以安装在两个主梁内的超薄型称重传感器为承载器支撑。采用两根可以相互插入的空心闭合矩形截面铝合金型材做横梁, 形成可以伸缩的承载器, 并依靠横梁上的螺钉将其固定。在一根主梁上安装有携带提手, 承载器收缩后可以象公文箱一样提走。额定量程 300kg, 分度值 100g 的电子秤, 其承载器尺寸为 500mm×500mm, 承载器伸缩后尺寸为 500mm×250mm, 可伸缩型电子秤结构示意图如图 19 所示。

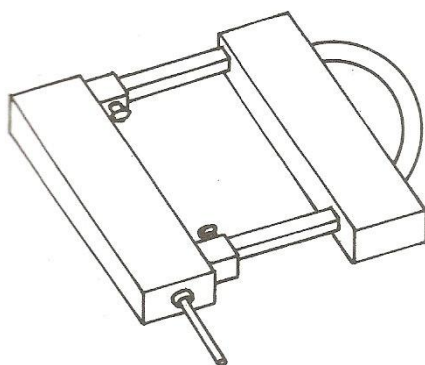


图 19 承载器可伸缩的电子秤

3 . 承载器面板可翻转的电子平台秤

在称量容易弄脏承载器面板的物料（例如水产品、家禽）时，常常为清洗面板而犯难，因为用水清洗很容易损坏称重传感器和接线盒。为解决此问题北美市场出现了承载器面板可翻转的电子平台秤。其承载器总体框架结构如图 12、图 13 所示的电子平台秤完全相同，只是承载器面板可以沿一边翻转。通过固定在承载器型钢上与面板铰支连接的自动伸缩推杆，使面板翻起、放下。面板翻起后可用水任意冲洗，直至完全干净为止。若承载器面板较大时，可分为两块由承载器中间向两边翻转。面板向一边翻转的电子平台秤结构示意图如图 20 所示。

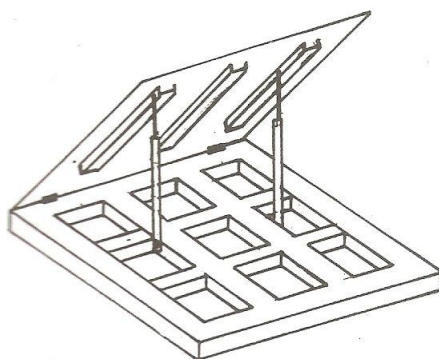


图 20 面板可翻转的电子平台秤

4. 码垛电子秤

为适应一些大批量货物码垛储存需要，美国 Aerogo 公司推出了 660—PW (Paiiet Weigher) 型码垛电子秤，是利用薄型电子平台秤的周边承载形式，采用一边开口的 U 型结构，其承载器结构示意图如图 21 所示。

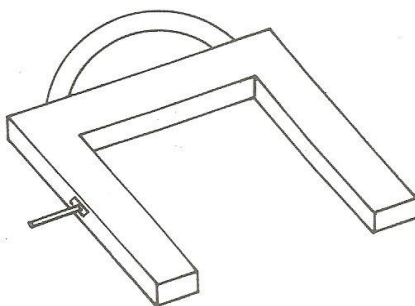


图 21 码垛电子秤结构示意图

660—PW 码垛电子秤系列的额定量程为 5000~10000Ib (2270~4540kg)，外形尺寸 60'×60'×3' (1524mm×1524mm×76.2mm)，可达 OIMLIII 级 3000d 准确度。

5. 分体式滚动圆捆纸张电子秤

为了准确称量不同直径、不同宽度的大型圆捆纸张等物品，美国 Aerogo 公司研发出低外形、分体式、宽度可调节的圆捆纸张称重计量电子秤。按承受重型载荷进行设计，因称量对象为圆捆纸张，所以承载器必须设计成分体式结构，即从中间断开两边承受外载荷。分体式承载器的两边均采用方形空心截面梁与带有薄型称重传感器的承载圆盘相组合的焊接结构。根据圆捆纸张的直径尺寸，决定中间断开的距离，使全部载荷由分体式承载器的四个承载点承受。在每个承载点上不仅安装有薄形称重传感器，而且还有压力可调节的气压缓冲支撑，保证称量的稳定性和准确度。两个组成分体式承载器空心截面梁之间并联组秤的导线用弹性软管连接，便于调节分体式承载器的宽度。在左空心截面承载梁弹性软管处安装有连接称重显示控制仪表的快速连接插座和气压缓冲支撑的压力调节器，便于快速连接称重显示控制仪表和对四个气压缓冲支撑的压力进行调节。分体式滚动圆捆纸张电子秤及称重计量示意图如图 22 所示。

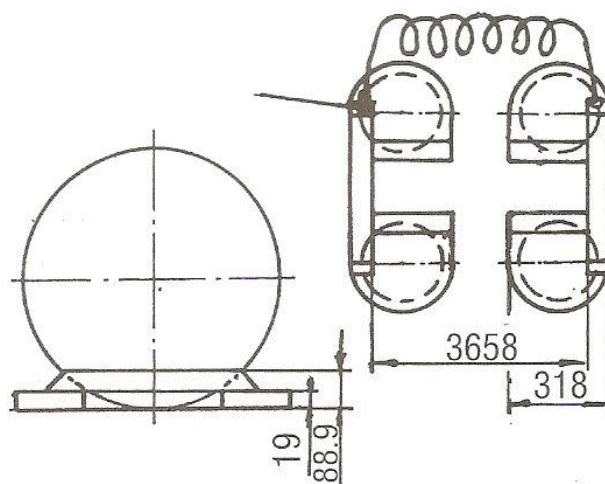


图 22 分体式滚动圆捆纸张电子秤

分体式滚动圆捆纸张电子秤的特点如下：

- (1) 由于分体式承载器的宽度可以任意调节，所以可非常灵活的对多种尺寸的圆捆纸张进行称重计量；
- (2) 在紧凑的有效距离内，具有较高的灵敏度；
- (3) 可在任何方向进行称重计量；
- (4) 操作控制安全可靠；
- (5) 滚动的圆捆纸张卡在分体式承载器上，减少了前后滚动和损坏传送机构的危险性；
- (6) 分体式承载器支撑上备有压力缓冲支撑垫，防止代价大的滚动损坏，同时还可以保护四个支撑底部的表面；
- (7) 用较少的人力就可以获得较大的称重能力；
- (8) 无活动部件，使用方便，维护简单。

美国 Aerogo 公司分体式滚动圆捆纸张电子秤共有 4000Ib (1816kg)、8000Ib (3632kg)、12000Ib (5448kg) 三种额定量程，16 种尺寸规格供用户选择。称量圆捆纸张的直径从 24" (610mm) 到 84" (2134mm)，最大称量宽度 12' (3.66m)。

七、空心闭合截面薄壁型钢结构电子平台秤的设计与计算

空心闭合截面薄壁型钢结构电子平台秤，有型钢并联平行排列的“竹排”式和横竖交叉排列的“方格”式两种结构形式。现以承载器尺寸为 800mm×600mm×80mm，量程为 10t 的型钢并联平行排列的“竹排”式结构为例，进行设计与计算，其承载器结构和悬臂剪切梁型称重传感器安装位置如图 23 所示。

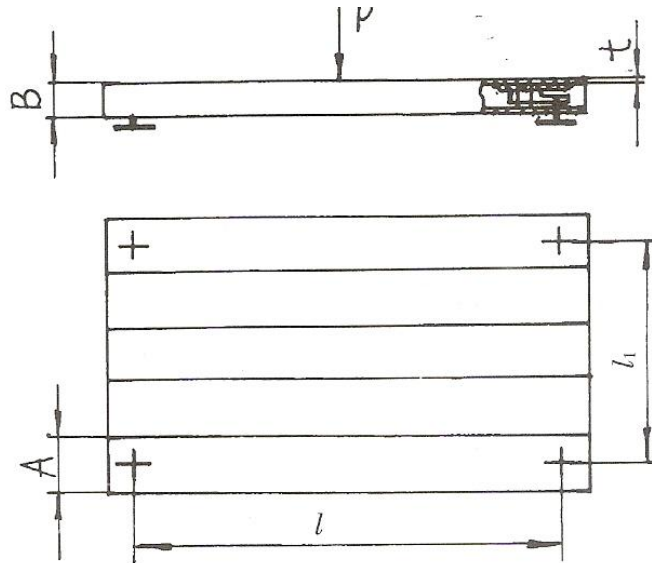


图 23 空心闭合截面薄壁型钢电子平台秤结构示意图

为满足承载器尺寸要求，选择 J120×80×4 空心闭合截面薄壁型钢，截取 800mm 长的 5 根并联焊接成为一个整体结构，四个悬臂剪切梁型称重传感器分别安装在外侧的空心闭合截面薄壁型钢内，称重传感器引入载荷的圆盘支柱，就是电子平台秤的承力支撑点。为简化计算，取一根型钢进行分析，并简化为中间受一集中力 P_1 作用的双端简支梁，其力学模型、截面尺寸及应力分布如图 24 所示。

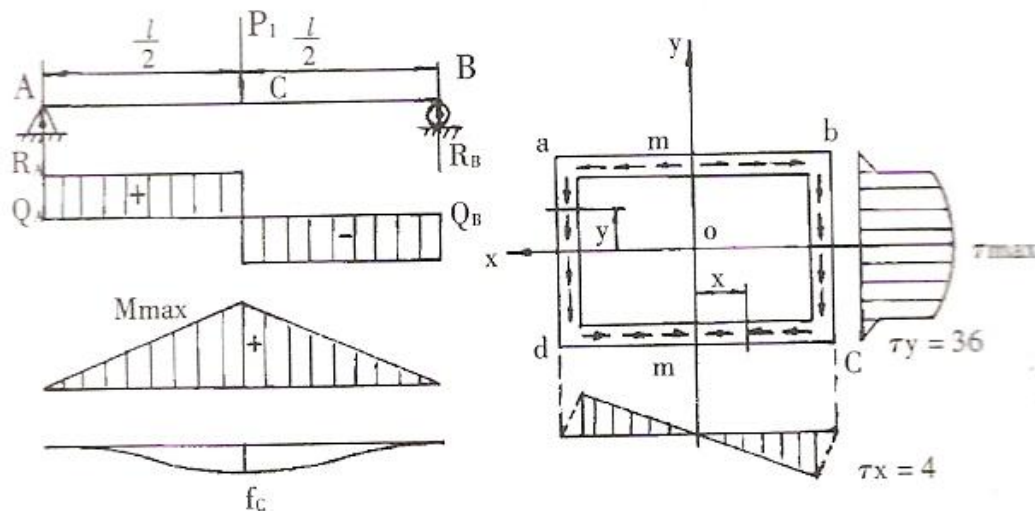


图 24 力学模型及截面应力分布图

由于承载器是用 5 根空心闭合截面薄壁型钢并联焊接的整体结构，当外载荷作用在承在器中点时，产生的弯曲应力最大，弯扭的正应力以及与弯扭正应力相适应的剪应力

也最大。因此，除重视弯曲应力外，还应特别重视作用在空心闭合截面薄壁型钢上的扭转力矩在截面壁厚上产生的剪应力。

J120×80×4 空心闭合截面薄壁型钢的截面尺寸为：A=120mm，B=80mm，t=4mm。承载器尺寸为 l=700mm，l₁=480mm。电子平台秤额定量程为

$$P_1 = \frac{P}{5} = \frac{10000}{5} = 2000 \text{ kg}$$

由材料力学知：

$$\text{两端的支反力} \quad R_A = R_B = \frac{P_1}{2} = 1000 \text{ kg}$$

$$\text{集中力两边的剪力} \quad Q_A = R_A = 1000 \text{ kg}$$

$$Q_B = -R_B = -1000 \text{ kg}$$

截面的最大弯矩

$$M_{\max} = M_C = \frac{P_1 l}{4} = \frac{2000 \times 700}{4} = 350000 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

1. 弯曲应力计算

截面对 X 轴的惯性矩

$$J_X = \frac{AB^3 - (A - 2t)(B - 2t)^3}{12} = \frac{120 \times 80^3 - (120 - 2 \times 4)(80 - 2 \times 4)^3}{12} = 1636352 \text{ mm}^4$$

截面抗弯模量

$$W_X = \frac{J_X}{\frac{B}{2}} = \frac{2J_X}{B} = \frac{2 \times 1636352}{80} = 40908.8 \text{ mm}^3$$

则弯曲应力、应变为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_X} = \frac{350000}{40908.8} = 8.566 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{8.556}{2.1 \times 10^4} = 407 \times 10^{-6}$$

2. 空心闭合截面薄壁内的剪应力计算

距离中性轴 X 为 Y 的任一点的静矩为

$$\begin{aligned}
S_x &= At \frac{B-t}{2} + 2 \left[t \left(\frac{B}{2} - t - Y \right) \left(\frac{\frac{B}{2} - t - Y}{2} \right) + Y \right] \\
&= \frac{At(B-t)}{2} + t \left[\left(\frac{B}{2} - t \right)^2 - Y^2 \right] \\
&= \frac{120 \times 4(80-4)}{2} + 4 \left[\left(\frac{80}{2} - 4 \right)^2 - Y^2 \right] = 18240 + 4(1296 - Y^2)
\end{aligned}$$

空心闭合薄壁矩形截面可以看成多个长方形截面组成，因此可以用如拉夫斯基公式求薄壁内的剪应力，其值为

$$\begin{aligned}
\tau &= \frac{QS_x}{J_x b} = \frac{Q}{J_x \cdot 2t} S_x \\
&= \frac{1000}{1636352 \times 2 \times 4} [18240 + 4(1296 - Y^2)]
\end{aligned}$$

可见，薄壁 ad、bc 内的剪应力沿截面高度成抛物线变化。

当 $Y=0$ 时

$$\tau_{Y=0} = \tau_{\max} = \frac{1000(18240 + 4 \times 1296)}{1636352 \times 2 \times 4} = 4.854 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{当 } Y = \frac{B}{2} - t = \frac{80}{2} - 4 = 36 \text{ 时}$$

$$\tau_{Y=36} = \frac{1000 \times 18240}{1636352 \times 4 \times 4} = 1.393 \text{ kg/mm}^2$$

薄壁 ab、cd 内的剪应力，在垂直对称轴 Y 上 m 点的剪应力为零。

对于距 Y 轴为 X 的任一点的静矩为

$$S_Y = tX \frac{B-t}{2} = \frac{t(B-t)}{2} X = \frac{4(80-4)}{2} X = 152 X$$

同样利用如拉夫斯基公式，则

$$\tau = \frac{QS_Y}{J_y b} = \frac{1000 \times 152}{1636352 \times 4} X = 0.023 X$$

可见，薄壁 ab、cd 内的剪应力沿截面宽度成线性变化。

当 $X=t=4$ 时

$$\tau_{x=4} = 0.023 \times 4 = 0.092 \text{ kg/mm}^2$$

3. 梁中心最大挠度计算

$$f_{\max} = f_c = \frac{Pl_1^3}{48EJ_x} = \frac{2000 \times 700^3}{48 \times 2.1 \times 10^4 \times 1636352} = 0.416 \text{ mm}$$

4. 梁受扭矩作用时的应力计算

当集中载荷 P 作用在承载器中心时, 各空心闭合截面薄壁型钢均受到扭转力矩作用, 以外侧型钢为最大, 其值为

$$M_n = \frac{P}{4} \cdot \frac{l_1}{2} = \frac{Pl_1}{8} = \frac{10000 \times 480}{8} = 600000 \text{ kg-mm}$$

由承受扭矩作用的心轴薄壁圆轴 (外半径 R, 内半径 r, 壁厚 t) 的计算知, 剪应力对圆轴轴线的力矩之和即为横截面上的扭矩 M_n 。因空心截面轴的平均半径 R_0 为

$$R_0 = \frac{R+r}{2}$$

则

$$M_n = \int_F (\tau dF) R_0 = \int_0^{2\pi} \tau R_0 (R_0 d\theta) = \tau (2\pi R_0^2 t)$$

所以

$$\tau = \frac{M_n}{2\pi R_0^2 t} = \frac{M_n}{2\omega t}$$

式中 $\omega = \pi R_0^2$, 为壁厚中心线所围的总面积。

上述剪应力计算公式, 是在横截面上的剪应力沿壁厚均匀分布的假设下推导得出的, 对于非圆截面的空心闭合薄壁截面梁都是适用的, 而且不要求壁厚沿横截面周线为常数。这时, 式中的 ω 为非圆空心截面壁厚中心线所围的总面积。当壁厚 t 不为常数时, 最大剪应力将发生在壁厚最小处。

利用上述公式, 就可以求出受扭矩作用的心轴闭合截面薄壁型钢各边的最大的剪应力, 即

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{M_n}{2\omega t} = \frac{M_n}{2(A-t)(B-t)t} \\ &= \frac{600000}{2(120-4)(80-4) \times 4} = 8.507 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

5. 相对扭转角 ϕ 的计算

利用外力的功在数值上等于变形能的原理，相对扭转角 ϕ 与扭矩 M_n 成正比，故外力的功为

$$A = \frac{1}{2} M_n \phi$$

剪切应变能为

$$U = \frac{\tau^2}{2G} \cdot V = \frac{\tau^2}{2G} \cdot \frac{Stl}{2} = \frac{\tau^2 Stl}{4G}$$

式中：V—受扭矩作用薄壁的体积， $V = \frac{Stl}{2}$ ；

S—空心闭合截面薄壁型钢的中心线长度；

τ —扭矩作用薄壁各边的剪应力；

G—空心闭合截面薄壁型钢材料的弹性模量。

由 $A=U$ ，得

$$\frac{1}{2} M_n \phi = \frac{\tau^2 Stl}{4G}$$

将空心闭合矩形截面的 $S = 2[(A-t) + (B-t)]$

$$\tau = \frac{M_n}{2\omega t}$$

$$\omega = (A-t)(B-t)$$

代入上式，得

$$\frac{1}{2} M_n \phi = \frac{M_n^2 \cdot 2[(A-t) + (B-t)]t}{4(A-t)^2(B-t)^2 \cdot t^2 4G}$$

则

$$\phi = \frac{M_n [(A-t) + (B-t)]}{4tG(A-t)^2(B-t)^2} = \frac{600000(116+76) \times 700}{4 \times 4 \times 0.71 \times 10^4 \times 116^2 \times 76^2} = 0.009 \text{ 弧度} = 0.52^\circ$$

单位扭转角 θ 的计算

$$\theta = \frac{\phi}{\frac{l}{2}} = \frac{M_n[(A-t)+(B-t)]}{2tG(A-t)^2(B-t)^2} = \frac{600000(116+76)}{2 \times 4 \times 0.71 \times 10^4 \times 116^2 \times 76^2} = 0.000026 \text{ 弧度}$$

$$= 0.0015^\circ$$

可见，空心闭合矩形截面薄壁型钢受纯扭转时，横截面上的剪应力与截面周边相切，且沿壁厚均匀分布。

八、结束语

任何一种电子衡器，其承载器结构的发展与创新都是以用户的需要为基础，以电子衡器市场竞争为导向，并依赖于制造技术而发展起来的。从近些年来北美、欧洲、日本电子衡器市场的销售情况和美国、德国、日本国际称重与计量设备展览会上展出的产品，不难看出各国电子衡器制造企业都非常重视产品的内在和外观质量，以及承载器结构的创新和自主知识产权产品的开发。模块化及小模块化拼装式电子汽车衡；集成化称重轨、称重板、称重钩、称重环；轻型化薄型、超薄型空心闭合截面薄壁型钢结构的电子平台秤；低外形的槽钢 U 形口与花纹钢板焊接成闭合截面型钢的电子平台秤；承载器可以伸缩折叠、承载面板可以翻转清洗的电子平台秤；承载器为分体式的滚动圆捆纸张电子秤；电子码垛秤等代表了电子衡器承载器结构创新与扩大应用的发展方向，值得我国电子衡器制造企业在开发新产品和自主知识产权产品参考借鉴。希望我国电子衡器制造企业，在采用新技术、新材料、新工艺上下功夫，把握电子称重技术发展的世界潮流和战略前沿技术，实施“创新竞争战略”，不仅要成为市场竞争的主体，同时也要成为技术创新的主体，在我国衡器工业改革和转型发展的攻坚时期，研发出满足国内外电子衡器市场需求的新产品。

参考文献

- 【1】 Patrick Mara. Off-Road vehid weighing, Weighing and Measurement, February 2009.
- 【2】 INSCALE. Product Spotlight- INSCALE Truck Scales, Weighing and Measurement, April 2002.
- 【3】 GENERAL. Pallet weighing Scale, Weighing and Measurement, April 2002.

- 【4】 TREVOR DEAKIN CO.LTD(ENGLAND), Axle Weighfrs (TgpeFWCF-10),
http:www.cimec.com/Trevor.hem, 1998.
- 【5】 INERCOMP. Ax900 Axle Scales, Weighing and Measurement, June 2002.
- 【6】 国际称重与计量协会 (ISWM), 2006 国际衡器展览会资料, 2006。
- 【7】 国际称重与计量协会 (ISWM), 2010 国际衡器展览会资料, 2010。
- 【8】 日本计量机器工业联合会, 2006/2007 东京计量计测机器工业展览会总览,
2006 年 4 月。
- 【9】 德国 PFISTER 公司. 称重轨动态电子轨道衡样本资料, 2002 年。
- 【10】 加拿大 Mass Load 公司. 称重梁及称重板动态公路车辆轴重秤样本资料,
2000 年。
- 【11】 美国 AMCELLS 公司. 薄型板式电子平台秤样本资料, 2002 年。
- 【12】 A. 捷列斯维克 (美国) 著. 何福照等译, 薄壁杆件结构计算理论, 人民
交通出版社, 1987 年 9 月。

作者简介：刘九卿 (1937—), 男、汉族，辽宁省海城市。中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，衡器技术专家委员会顾问，《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》、《国家职业资格培训教程—称重传感器装配调试工》，在有关杂志上共发表学术论文 110 多篇。