

机械结构设计中的创新设计及应用方法探究

阎相忠 陈世军

贵州航天风华精密设备有限公司 贵州贵阳 550000

摘 要: 机械结构设计是机械产品研发的核心环节,直接影响产品的性能、成本与市场竞争力。随着制造业向智能化、轻量化、高效化转型,传统结构设计模式已难以满足复杂工况需求,创新设计成为突破技术瓶颈的关键。本文从机械结构创新设计的内涵出发,分析其在现代制造业中的重要性,系统阐述材料变元、数量变元、位置变元等创新设计方式,结合结构变异化、性能化、宜人化、便捷化等应用方向,探究创新设计在实际工程中的落地路径。

关键词: 机械结构设计; 创新设计; 应用方法

机械结构设计是将功能需求转化为实体形态的创造性过程,其核心在于通过合理的结构布局、材料选择与工艺适配,实现产品在强度、刚度、稳定性等方面的性能目标。传统设计多依赖经验积累与类比模仿,在面对高端装备、复杂工况等场景时,常出现结构冗余、效率低下、适应性不足等问题。制造业当前正经历数字化与智能化变革,新能源装备、精密仪器、智能机器人等领域对机械结构提出了更高要求。

1 机械结构创新设计概述与重要性

机械结构创新设计主要是在满足功能需求的条件下,通过调整结构组成、材料性质、连接方式等要素,来实现性能优化或扩展功能的全新设计理念。相比于传统的设计思想,“经验驱动”到“需求驱动”的转变是一种模式上的突破,是侧重于整体框架的设计元素进行构架而不是对于部分设计元素的修补的过程。^[1]例如,传统的齿轮传动一般是按照标准模数和标准齿形进行的,而通过应用非圆齿轮的偏心结构可以获得变传动比的需要,以满足间歇运动需求。在现代制造业当中,其特点主要有三:一是提高产品的性能,优化产品结构以更好地改善产品动态特性;二是控制生产成本,有效地减少材料消耗和加工工序;三是赋予产品优势,设计出具备优良互换性、方便装卸的产品,满足用户使用需求。

2 机械结构创新设计方式

2.1 材料变元法

材料变元法是根据工况要求,针对强度、密度、耐腐蚀等方面的差异选取和传统材料性能相差较大的材料。如传统的桥式起重机横梁均采用 Q235 钢,采用碳纤维增强复合材料后,在保持结构抗弯强度不变的基础上,重量减轻

45%,运行耗能下降 20%。材料变元不是简单的换材料,需要针对结构受力的不同调整材料布置。某型深海探测机器人耐压壳体原先为整体钛合金结构,由于采用了“钛合金骨架+陶瓷内衬+聚氨酯缓冲层”复合结构,利用陶瓷层承受海水压力,聚氨酯层消减冲击载荷的作用,将壳体厚度由原来的 25 mm 降到了 12 mm。另外,智能材料方面还可通过采用形状记忆合金用作管道连接的结构,在发生形变时可实现自身收缩密封的目的,以此克服传统法兰连接方式易产生泄露的问题。

2.2 数量变元法

数量变元主要是通过增加或者减少某一结构组成单元的数量来优化机械系统,减少零件数目的数量变元以减小装配误差和装配故障的概率。某型齿轮泵将传统的 12 个零件集成设计为 3 个部件,采用整体锻造工艺实现了泵体、端盖二者的合为一体,并使装配间隙波动由原来的 ± 0.05 mm 缩小到 ± 0.02 mm,容积效率提高到了 95% 以上。增加零件数目则主要是为了获得功能分立及调节灵活的效果,如高精度伺服平台传动系统,在传动系统采用三级行星齿轮组取代传统的单级蜗轮蜗杆装置。然而,由于增加了齿轮数量而使得传动比具有了多级可调的可能性,将调速范围从原 1 : 50 扩展到了 1 : 200,并提高了定位精度至 0.001° 。数量变元不可盲目增减,还应该通过运动学仿真来验证其最优单元数量是否合适,比如某输送机械原来链传动增加张紧轮到 3 个反而因受力均匀而导致链条磨损加快的情况,后经改进,采用 2 个张紧轮方案最佳。^[2]

2.3 位置变换法

位置变换法根据不同的位置参数来变换结构部件的空间布局或相对位置来改善受力状况或者提高某种性能。一般而言,其主要是将传统电机同轴布置方式与主轴组合,易发生两者产生的振动相互叠加情况,将电机移至主轴一侧,采用同步带传动,主轴径向跳动由 0.01mm 降为 0.003mm,加工表面粗糙度 Ra 值由 $1.6\mu\text{m}$ 提升到 $0.8\mu\text{m}$,也可以根据位置变换法调整单一零件在不同位置的参数实现结构多功能复用。某型号装载机将液压油箱从车身侧面移到配重内,并把配重壳体用作油箱壁,不仅节省了空间、让整个车身缩减了 300mm 的长度,还可以通过配重重心增大油箱散热面积,保证油箱油温维持在 55°C 以下。

2.4 联通变元

联通变元聚焦于结构连接形式的变化来创新,通过改变部件间的连接类型或者接触状态,从而达到优化力的传递路径或者实现了连接结构的可拆卸的目的。传统螺栓连接在振动环境下容易产生松动,某风电设备的法兰间采取了“锥面配合+环向抱紧”的联通方式,利用锥面自锁加液压夹紧装置的方法使连接的刚度提高了 30%,其拆装的时间也由原来的两个小时缩短为了半小时。柔性连接是联通变元重要的一个发展方向,在精密仪器的隔振结构中采用空气弹簧取代刚性支撑来吸收振动能量,使振动振幅从原来 0.1mm 衰减到 0.01mm。除此之外,磁吸连接、卡扣连接等一些新的连接方式,扩展了联通变元的应用。比如便携式工具中采用磁吸式电池舱的设计方案,通过采用钕铁硼磁铁可以实现电池快速地与主机定位并实现连接,而且经多次拆装后,重复拆装精度误差也不超过 0.05mm。

2.5 尺寸变元法

尺寸变元是以调节结构的关键尺寸参数为基础来实现各种匹配的一种方法。如在齿轮传动中,若把模数由 2mm 增大到 2.5mm 可以提高齿根弯曲强度 20%,但是同样要调整中心距,不然会引起干涉。在微型减速器中,将齿轮厚度减小为 5mm,承载能力略有下降,却达到了无人机云台所需要的轻量化要求,此处尺寸变元不考虑强制关联,可单独建立不同的模块来满足各部分的需求。尺寸变元还要遵守比例协调原则。比如某型液压油缸,当活塞杆直径由原来 30mm 增到 35mm 的同时,同步将缸筒壁厚由 5mm 增加到 6mm,使缸筒和活塞杆强度匹配最好,从而消除局部应力集中。^[3]

2.6 工艺变元

工艺变元改变了以往只能通过单一或几种工艺手段使结构成型的局限性,其主要是利用 3D 打印技术实现了复杂内腔结构,实现把航空发动机燃油喷嘴由传统工艺的 20 个零件合并成一套结构,流道精度达到 0.05mm,燃油雾化率提高了 15%。另外,工艺变化还可以改善结构的微观性能,起重机吊钩传统铸造成型过程中由于是铸造造成的型其内部容易形成气孔,通过使用模锻工艺使得金属晶粒细化以后可以使起重机吊钩的冲击韧度得到提高,因此其安全系数由原来的 3.5 提升到了现在的 4.0。而对于批量产品的加工过程中应考虑成本问题,将汽车某零部件的机加改为冲压后,该种产品加工所需时间由原来的每件 8 分钟缩短到仅需 1 分钟,但由于模具的投入加大,那么就需要考虑产品的年产量大小,只有当产品的年产量大于等于 10 万件时才会由于冲压而使得产品的总成本比原来机加方式少 25%。

3 机械结构创新设计的应用

3.1 结构变异化设计

结构变异化设计是通过变化传统结构的形式特点达到拓展功能或者满足环境要求的设计方式。对于工程机械领域,传统挖掘机定型动臂变为折叠结构、多段式铰接使得整机在运输时的高度由 3.5 米降至 2.8 米,既满足公路运输限高又扩大了工作半径 1.2 米。变异化设计可以解决特殊工况的问题,某极地科考车变异成“三角履带+轮式”的复合结构,履带动感在冰面上运行时采用履带减小了压强,在碎石路上再用轮式方式提高速度,以不同形态的结构来适应不同的路况。在精密机械中,变异化设计更主要表现为微观结构上基于力学变化的改变,如微型轴承把传统结构的钢珠滚动体变异成圆柱滚子,使其单位体积所能承受的载荷较原来增加了 50%,符合小型化电机需求。国内某农业机械公司设计开发的一种智能化谷物联合收割机,针对丘陵山区复杂地形的特点,对其传统刚性割台结构进行变异化改造。由于传统割台都是固定角度的,在大于 15° 坡度时容易造成漏割以及籽粒破损,经改造后的新型割台在各个部位采用了三段式的变角结构,增加一根液压杆作为变角支点,让割台能随着地形坡度的变化自动伸缩和变换角度,并在割台下部增加弹性的仿形板,保持割台和地面之间保持 5 ~ 8cm 的动态空隙。这种变异结构在丘陵地区稻田作业时,丘陵地块收割增产幅度达到 20%,籽粒破损率降低 3.5 ~ 1.2 个百分点,在云南、四

川等山区推广使用解决了传统收割机“山地不适”等问题。^[4]

3.2 结构性能化设计

结构性能化设计是以提高某个或某些性能为目标,通过参数优化、形态重构完成的目标,高速列车转向架采用“空心轴+弹性定位”替代传统的实心轴刚性连接,转向架簧下质量降低约 20%,在通过 160km/h 的速度时,减振降噪效果明显,振动加速度由原来峰值 0.15g 下降到 0.08g。对于极端环境下适用的结构性能化设计更加具有挑战性。某核反应堆的冷却水泵叶轮采用了双金属复合结构,其叶片表面堆焊了耐蚀合金,叶轮基体为高强度钢,既能防止高温冷却水对叶轮的腐蚀,也能保证叶轮的强度,使用寿命可达 3000 h。性能化设计应该利用有限元方法进行校验。三一重工为大型履带式起重机研制的“变截面主臂”正是性能化设计的一种体现,起重机主臂采用等截面箱型结构,在吊重达到 500t 以上时臂架自重占比大于 35%,即占有效起重量的 35% 以上,严重限制了有效起重量,采用 ANSYS 拓扑优化技术改变起重机主臂的传统构型,通过在主臂截面由根部至端部呈阶梯状逐渐减小,内部设置变厚度筋板达到主臂轻量化的目标,其自重比原来减少了 28%。

3.3 结构宜人化设计

结构宜人化是在注重人机交互性体验的过程中调整结构、调整人机之间联系的一种降低人劳动强度或者提升使用安全性的方式,在机床的操作面板上把原来固定的按钮转为可转动的旋钮,并将旋钮向一侧倾斜了 30°,使操作者手臂运动范围缩小了 15cm,连续动作疲劳度降低了 25%。安全防护结构上的宜人化也非常有必要,对于一些类型的冲床,则采用一种红外线感应式防护挡板,当人的手进入到危险范围内时,机器就停止工作,其反应速度小于 0.1 秒。因此,相比于传统的利用挡板保护的做法而言,更加省心,也不用担心频繁打开挡板的问题。徐工集团提出对港口集装箱正面吊的操作舱开展宜人化创新设计,在此之前,传统的操作舱采取操纵杆与座椅呈 90° 垂直布置的方式,司机工作 8 小时后,腕关节的劳损率会达到 40%。基于 500 名操作员的人体模型数据,将操纵杆改为以 15° 方式安装,使其与座椅扶手形成一个自然握持的角度,并将操作面板下降 12cm,这样可以使视线的俯视角度由原来 60° 优化为 45°,同时减少了脖子的倾斜程度,除此之外还在这个基础上减小了脚

踏板的压力点。在此应用中可以看到,调整到 45° 视线俯角位置,比 60° 减轻腕关节受力 55%,降低腰疲劳度评分,从 8.2 分(满分 10 分)下降到 3.5 分,提升港口连续作业效率 12%,这一设计成了国内港口机械标仓化设计。

3.4 结构便捷化设计

结构便捷化是为了简化操作步骤,节省运行、维护时间。比如某型发电机组的“抽屉式”模块结构设计方案中,将发动机、发电机、控制系统分别划分成 3 个独立模块,更换故障模块的时间由 4 小时降到 1 小时,平均故障修复时间(MTTR)降低到 0.5 小时。连接结构便捷化的创新应用,如某管道阀门采用了“快插式”的密封结构,利用 O 形圈和锥面的配合,使该连接结构的装配过程非常简单快捷。例如,该种结构连接方式下安装仅需要 5 分钟,相比传统的法兰连接节约了 25 分钟,密封可靠达到了 10MPa 不会出现任何的泄漏现象。另外,便携式的设计不仅要考虑便捷化的同时还要兼顾轻量化,如某类检测仪器通过多关节铰链结构实现了检测仪器的三维折叠,收纳时所占空间仅为工作状态下 1/3 大小,其总重不超过 3kg,非常便于随身携带与使用。

4 结语

机械结构创新设计是制造业技术进步的核心驱动力,其通过材料、数量、位置等多维度的变元优化,打破传统设计思维定式,为产品性能提升、成本控制与功能拓展提供有效路径。从实际应用来看,结构变化设计增强了产品的环境适应性,性能化设计满足了高端装备的精密需求,宜人化设计提升了人机交互体验,便捷化设计优化了运维效率,这些应用方向共同推动机械产品向高效化、智能化、人性化发展。

参考文献:

- [1] 林振生. 机械结构设计中的创新设计应用研究[J]. 中国设备工程, 2022, (07):126-127.
- [2] 唐伟. 创新设计在机械结构设计中的应用[J]. 南方农机, 2023, 50(22):15+26.
- [3] 蒋良荭, 刘蒙, 王逸鸣. 创新设计在机械结构设计中的应用研究[J]. 兵工自动化, 2022, 38(07):41-42+51.
- [4] 董燕. 创新设计在机械结构设计中的应用[J]. 科技风, 2022, (19):151.