企业永续经营之利器——互换性设计

编译 | 李建、王蕾

2020 年全世界发生新型冠状病毒感染人类，目前感染人数急剧暴增，尤其欧美国家，严重影响工业制造与组装产业之开工日期。苹果公司执行长库克感悟到零部件必须要第二来源，其中成败关键在零部件必须纳入互换性设计，避免重回试误法延迟上市时间与资材浪费。

地球资源有限，人人要珍惜，机床设备或产品所需之材料、零部件于设计之初当思考能使用寿期，除满足特定功能规格需求外，尚需考虑能耐操、可靠、好用、易拆卸维修及绿色回收等亲和力，因产品或机床设备之价格较昂贵，站在消费者或客户立场，能维修就比新购置划算，同时也对企业公司之质量增加认同度，有利于企业公司生存发展，永续经营，其中零部件是否具备可互换性设计就成为极具关键之因素。

互换性设计之重要性

互换性可分为全互换性与半互换性两种，全互换性是指零部件可任意组配于相同之相邻零部件，而半互换性系指以次总成零部件为单位，与相邻零部件可任意组装。例如引擎零部件内之任何零部件均能随意凑合，组装成引擎组件，不是边组装边整修才能组装。而半互换性则以任意引擎零部件，均能轻松装进同型任一台车壳，不会发生孔径大小或孔位没对准，尚需扩孔才能组装之问题。所以互换性设计直接影响到后续产线组装之效率与合格率，其重要性不言而喻，老板、主管与设计工程师不得不慎。

互换性设计之精义为公、母配于最严苛状况下，当孔径为最小时，销径为最大时仍可以组配，换言之；如孔径制作加工稍大且能符合图规公差内，就产生间隙更能顺利配合，同理；当销径制作加工稍小且能符合图规公差内，亦能产生间隙更方便配合。贵重机床设备或产品使用一段时间后难免会磨耗故障，第一优先需考虑维修，以增加寿期，降低购置成本负担，同时亦考验品牌质量耐操及可靠信誉之最佳验证机会，如果零部件当初设计已有互换性考虑，后续维修补保自然轻松方便顺利，亦可节省客户等待时间之损失与费用，也能博得客户赞赏与信赖度，持续甚至加重后续交易机会。

英人 Henry Mandslay(1771 ~ 1831) 于 Woolwich 兵工厂工作碰到组配互换问题。1771 法国面临相同问题，1811 年 Bodwer 曾推动零部件互换失败。1775 美驻法大使 Jefferson 看到兵工厂技工大量组装观念而引进美国。1789 ~ 1812 美国人 Eli Whitney 组装 15000 只毛瑟枪不顺利，凸显互换性之重要。1820 美国委托 Simeon North 制作 20000 支手枪，顺利交货。1831 美国 Cult 发明转轮手枪，1850 已运用互换性零部件组装手枪。1850 年美国钟表业已应用互换性零部件。1872 美国 GDP 取代英国霸主地位成为世界第一。

德国生产之经济学，生产过程之和

谐与安全，高科技产品之实用性，才是企业生产之灵魂，而非利润最大化。例如在清朝租借山东半岛时期之地下通道出入口处，必须高出地面一公尺，避免遇大雨进入通道，又如前些年污水道工程维修，无可用之零部件，遂请德国原厂支持，惟年代久远，且原厂已不存在，但建议备用件应位于 150 公尺处找找看。果然顺利发现规格兼容之备用件，且有防潮油纸包装保护。另外；例如锅盖内侧有加工成奇特花纹，盖上后，水蒸气就能上下自然循环，不易烧干，这是一种技术。锅盖与锅之间隙一致 (同心度极佳)，说三分钟开锅就三分钟开锅，能节省能源。

零部件互换性设计前置要项

产品研发阶段之轴孔配合 (公母配合) 经 CAE/CAD 模拟分析出公称尺寸后，下一步为进行可制性、易制性之细部设计，如量大则必需要求达到可 100% 互换性，任一轴件需可与任何孔件组配，同理；任一孔件可与任何轴件组配，关键在于如何决定轴孔件之尺寸与公差。

以前设备或产品组装非常依赖组立师傅之修配功力，如遇到孔径稍小或无法与轴件同心对位，将设法扩大孔径或椭圆孔，或整修小轴径稍微切削以利组立，完成组装成为零部件或产品之任务。然而这种事情必须向其直接上司或设计工程师回报，期望再次检视设计图之尺寸与公差，或要求制作单位或外包承制商改善。而其上司或设计工程师可能会立即检讨设计图，厘清问题，再依检测数据进行修改孔件或轴件之尺寸与位置，避免下次再犯，并作记录改善。也有可能因工作繁复而疏忽或束之高阁，时间一久又忘记。结果日后再次发工或委外制作，不能组装之现象又重复发生，又得浪费组配人员逐一整修，令人扼腕。

设计工程师如欠缺几何公差基准 (基准系统)、基准尺寸、位置公差等概念，可能没抓到重点，就一直陷于修改孔径或轴径尺寸公差，但仍无法改善不能轴孔同心对位之问题，如再加上累积误差因素纠结，改正时间遥遥无期，最终仍靠师傅整修，非根本解决之道。

零部件互换性道理很简单，当孔件之内径制作到最小 (尺寸下限) 时，而且配合之轴件外径制作到最大 (尺寸上限) 时，还能够组立装配。而当孔径制作偏离尺寸下限往上限变大一些，则轴孔配产生间隙变大，更容易组装。同理；如轴件外径加工尺寸往下限方向偏离，一样轴孔配之间隙变大，有助于组装。

约百年前之国际版尺寸公差与配合 (ASME/ISO-Limits and Fits) 已大幅提升互换性之比例，福特 T 型车大量生产为一项成功经典例子。至今 JIS、CNS 仍奉为规范之参考依据。但尺寸公差与配合规范内有一些不合理局限情形，美国持续针对其缺陷而发展出几何公差规范 (其实是全盘沿用)，并经二战庞大军品、工业产品需求孔急之考验，通过实际验证才颁布美国版与国际版，至今已逾 70 余年。

几何公差系统

首先将传统直角坐标系统改为几何公差系统，在尺寸标注下方增加一格长方格，第一小格选正确之几何公差符号 (2018 版修为 12 种)，第二小格为几何公差值，通常会在加注)，第三小格为基准，必要时可增至第四、第五小格，亦即制作加工参考用之 3D 坐标系统。以孔件为例，孔心在传统直角坐标系统受限于方形区之不合理限制，改为以对角线为直径之圆形区域，改善方向性之局限，同时又可增大 57.1% 之制作公差，提升易制性与合格率。

修饰语

如在几何公差框内之公差值后面加上修饰语如，意义为最大材料情况 (Maxi Mummaterial Condition，MMC)，或称最多留料情况。对孔件而言；即为孔径加工制最小直径 (尺寸下限)，如加工孔径偏离 MMC(孔径变大些)，则几何公差可随之等量增大，最多可达最小材料情况 (Least Material Condition，LMC)。同理；如为轴件 (实心棒料)，在几何公差框内之公差值后面加上修饰语如，即为孔径加工制最大直径 (尺寸上限)，如加工孔径偏离 MMC(轴径变小些)，则几何公差可随之等量增大，最多可达最小材料情况。这时需注意未用完之尺寸公差值不可移作几何公差，同样；未使用完之几何公差值不可移作尺寸公差，设计工程师、加工技术师与检测人员必须遵守，不可胡乱擅作其他解释，产生争议，尤其委外制作件，更需与承制商约定检测验收标准。这种因偏离或而增加之公差称之为红利公差 (Bonusto Lerance)，极像公司企业之年终红利。

零公差

在因应大量生产件之检测需求而有功能性检具套量，以确保通过检具之零部件一定可以组装，但由于检具设计考

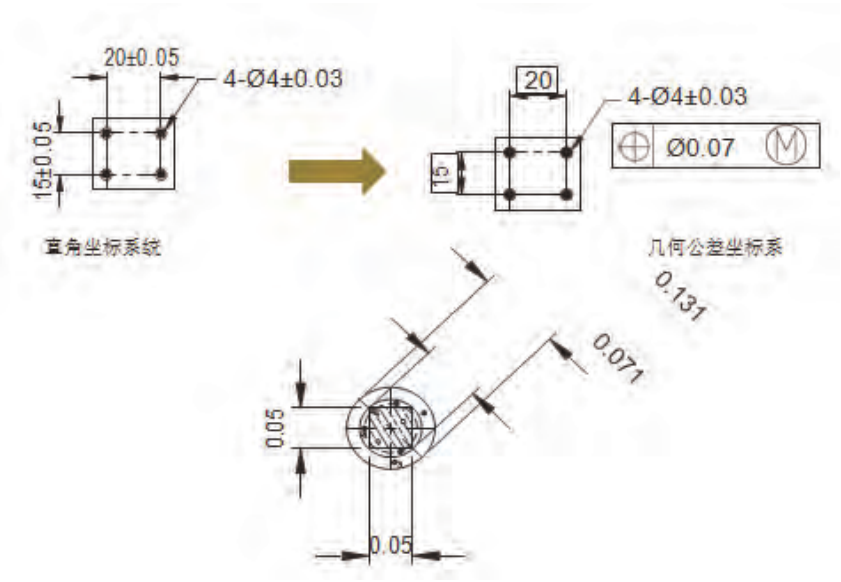

图 1 件坐标系统示意图

表 1　径与位置公差变异关系 (mm)

项次	量测孔径	量测位置公差	Bonus tol	位置公差	允收 / 拒收
1	3.97	0.07	0	0.07	○
2	4	0.1	0.03	0.1	○
3	4.03	0.13	0.06	0.13	○
4	3.95	0.05		0.05	3.95 < 3.97 ×
5	3.98	0.1	0.01	0.10 > 0.08	×
6	3.98	0.06	0.01	0.06 < 0.08	○
7	4.01	0.12	0.04	0.12 > 0.11	×
8	4.04	0.11			4.04 > 4.03 ×
9	4.03	0.14	0.06	0.14 > 0.13	×

虑因素，可能发生通过检具套量后，在定量抽验尺寸时发现少部分超出公差之现象，ASME 与 ISO 国际版规范中，则赋予零公差之规特殊任务，特别通融将几何公差值可降为零而转化为尺寸公差值，三度扩增制作公差带，提升易制性与合格率，将原本被剔除之可用好零部件悉数化为合格件。实务上，可替高阶主管或产品负责人化解经常需主持特别裁示会议 (Material Review Board,MRB) 之困扰，因为零部件通过检具套量 (必可组装) 却于抽验时发现

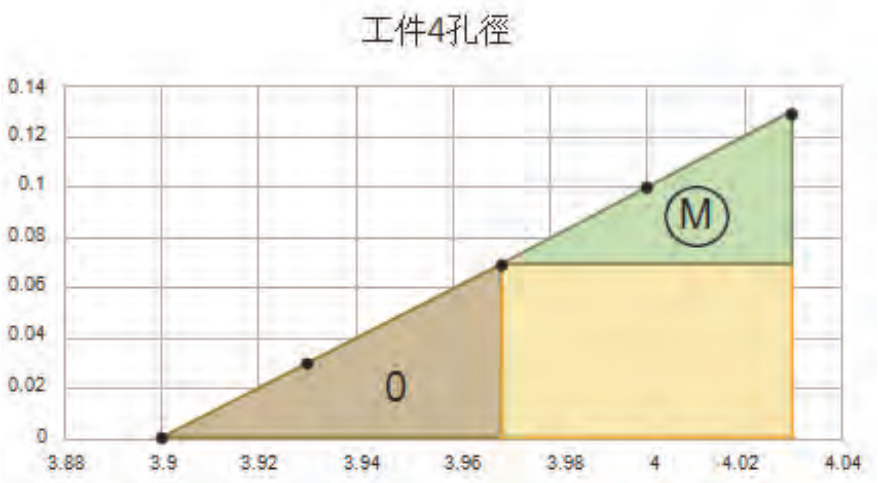

图 2 径与位置公差变异之动态公差图

超公差之情况，依理应判不合格件，导致全部无法后送组装线。事态相当严重，两难齐发。如老板、负责主管、设计工程主管或设计工程师、检测主管或人员只要有人认识零公差意义，即可轻松化解，全部变为合格件，并有可受公评之完整质量文件，不欺骗客户与公司，此项知识为规范含金量极高之技术。

虚拟情况

可达情况或实效情况 (Virtual Condition,VC) 意义为一个形体之虚拟情况是由一些指定公差所容许的，为各轮廓变异之综合效果所得到之大小。代表在最大材料情况下，最极端严苛条件之组装配合情况。简言之；轴件之虚拟情况 = 尺寸 + 形状或位置公差，孔件之虚拟情况 = 尺寸 − 形状或位置公差。

检具设计

运用虚拟情况再斟酌涵盖技术师傅合理之误差，取尺寸公差之 5% ~ 10% 做为检具之制作公差值，既可应付大量零部件之检测，又可确保每件套量后一定可组装，兼可节省高阶检测技术之人力负荷，彻底消除采用计数值检验抽样程序及抽样表方法 (MIL-STD-105E1989) 产生之少部分不合格品地雷，与额外浪费不合格品之资源成本与组装产线不顺利之现象。以 4 孔件说明直角坐标系统之缺陷与改进措施。

图 1 中第 1 点孔心位于 0.05mm 正方形区域内属于合格，但是第 2 点同属第 1 点到理论中心等距，却因与第 1 点相隔 45°，不幸落到 0.05mm 方形区域外而属不合格，这是传统直角座标系统之不合理缺陷之一，因隐藏方向性之限制，国内机制业不可不察。而几何公差针对此项缺失，改为以正方形对角线为直径之圆形区域 (ϕ0.07mm) 内较合理，完全解决方向性限制之缺点，360° 皆可，而且尚增加 57.1% 之公差区面积，立即提升易制性、良率与效率等皆有帮助。

另外于几何公差值后面紧接着修饰与，表示 ϕ0.071mm 为最大材料情况之数值。位置度公差 ϕ0.071 ㎜为以孔于最大材料尺寸（ϕ3.97mm）为准。当孔之尺寸偏离最大材料尺寸时，孔之位置度公差允许超过原来之公差带，于偏转范围内偏转其“位置”。如 ϕ0.131mm 增额公差为孔加工到最高极限尺寸 ϕ4.03mm 时之位置度公差。将几何公差框意义进一步解析如表 1。孔径与位置公差变异之动态公差图如图 2。

位置度原则应用时，其公差大小由设计师需要而定，此公差系由外形（孔及配合件）之最大材料尺寸来决定，非由坐标转换而成。

机械生产设备之零部件设计如早已纳入互换性公差元素，一旦碰到急单需求，即可采取扩增零部件制造厂商同步制作，同样组装配合亦可同步增加产线人力，因为零部件具备互换性功能，组装作业一定顺畅，设备出厂时程必可大幅缩短应急，如同口罩生产设备交货可缩短一半以上。盼国内相关业界能跟上潮流演变，学习老外长处，零部件具互换性居于最关键地位，提升技术，进而抢占商机，拚搏于国际市场，多赚外汇，调薪扩厂，精进核心技术，建立品牌，永续发展。MFC