

案例 4

玻璃加工机床的关键零件‘传动端头总成’的六西格玛公差设计

来源	国家自然科学基金资助项目 (项目编号: 70372062)	类别	<input checked="" type="checkbox"/> 案例 <input type="checkbox"/> 方法
作者	何桢 张志红 刘子先	关键词	六西格玛公差设计 并行质量工程 面向可制造性设计 面向六西格玛设计
理论知识	六西格玛公差设计 并行质量工程	适用层次	<input type="checkbox"/> 本科生 <input checked="" type="checkbox"/> 研究生 <input type="checkbox"/> MBA

1. 案例背景

工业界业已认识到合理的公差设计对于提高可生产性、产品质量和成本节约是一个关键的因素。从质量角度来看,公差设计属于设计质量的范畴。公差不仅影响产品的功能,而且影响到过程能力和测量的精度,是产品设计和加工过程的桥梁。公差设计是一种科学的分配公差的方法,用来评估设计中的重要子系统和零部件,以达到全部产品制造以及生命周期的成本最低^[12]。在机械装置中关键的公差通常是在装配中形成的零部件的累积公差。而装配中大量质量问题都源于几何设计,最终这些问题都体现在装配累积公差中^[13]。但目前大多数的研究都是将各种方法得到的结果相互比较,而没有一个明确的质量目标,无法衡量其质量水平,经常导致所分配的公差太紧或太松。这样就使制造成本大幅增加或者质量低劣,更没有持续改进的动力。 6σ 管理法通过过程优化和变异的减少(寻求稳健)达到成本的降低和提高顾客满意度,考虑过程能力,要求总公差宽度不得小于 $\pm 6\sigma$,即 $C_p \geq 2$, $C_{pk} \geq 1.5$,得到一个量化的目标; $DPMO$ (Defects Per Million Opportunities) ≤ 3.4 。

2. 案例描述

某公司生产玻璃加工机床,其中某一关键零件‘传动端头总成’的装配草图如图 1,尺寸链关系如图 2。

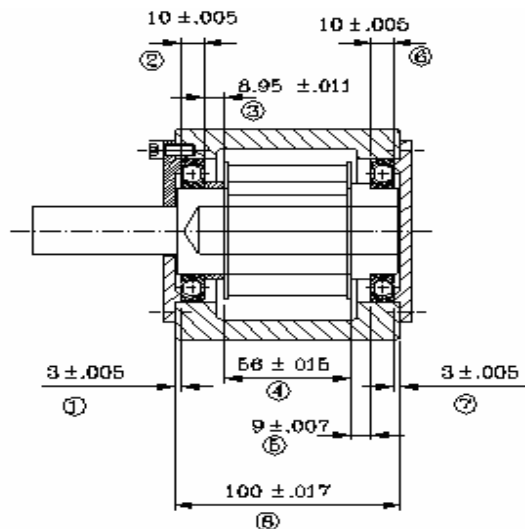


图 1 传动端头总成装配图

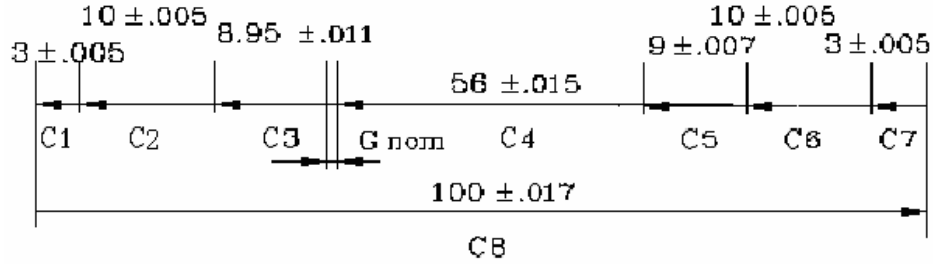


图2 装配关系尺寸链

公差设计包括公差的分析 and 分配，公差分析主要有极值法和统计法。质量必须一开始就设计进产品之中，因此在零件公差的分析 and 分配中必须应用过程能力数据。评价任何一种设计方法，必须有一个基准评价（benchmarking）才能使比较和分析有意义。在此应用[15]中的 WC—SRSS（Worst-Case Static Root-Sum-of -Squares）分析方法为基准，它既考虑了过程能力，其设计结果又是最保守的。其数学表达是：

$$Z_F = \frac{F - \sum_{i=1}^m (N_i + W_i k_i T_i) V_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (T_i B_i / 3C_{P_i})^2}} \quad (2)$$

第一步：对整个系统的各个公差进行分析评价

从此部件的性能要求上看，需要固定带轮（零件 C4）固定可靠且轴承转动灵活，因而间隔套（零件 C3）与带轮之间的间隙要求为： $R = 0.1mm$ ， $Q = 0$ 。

零件 C2 和 C6 是标准件，且精度很高，估计 $C_P = 2$ ；零件 C4 是外购件并已知其制造过程采用了 SPC，同样估计 $C_P = 2$ 。其它零件均在本公司内部加工，没有采用 SPC，故估计 $C_P = 1$ ， C_{Pk} 均为 1.5。这样就可以根据公式(1)计算各零件的标准偏差并得到间隙的标准偏差：

$$\sigma_G = \sqrt{(T_i B_i / 3C_{P_i})^2} = 0.008 \text{ mm}, \sigma_{Gk} = \sqrt{(T_i B_i / 3C_{Pk_i})^2} = 0.015 \text{ mm} \quad (i = 1 \sim 8)$$

分析结果如下：

$$G_{nom} = N_i V_i B_i = 100 - 3 \times 2 - 10 \times 2 - 56 - 9 - 8.95 = 0.05(mm)$$

$$G_{max} = N_8 + T_8 - \sum_{i=1}^7 (N_i - T_i) = 0.12(mm)$$

$$G_{min} = N_8 - T_8 - \sum_{i=1}^7 (N_i + T_i) = -0.02(mm)$$

$$Z_{crit} = \frac{F - G_{nom}}{\sigma_G} \quad (\text{利用 } C_P \text{ 计算})$$

$$Z_{crit} = \frac{F - G_{nom}}{\sigma_{Gk}} \quad (\text{利用 } C_{Pk} \text{ 计算})$$

表 1 装配间隙分析结果总结 (单位: mm)

装配间隙参数	间隙参数值	根据 C_P 计算的 Z_{crit}	根据 C_{pk} 计算的 Z_{crit}
G_{nom}	0.05	N/A	N/A
R	0.1	6.25	3.23
Q	0.0	-6.25	-3.23
G_{max}	0.12	8.75	4.52
G_{min}	-0.02	-8.75	-4.52

根据 WC-SRSS 分析, 利用公式(2)得到 $Z_Q = 2.65 < 4.5$, 无论从动态的过程能力 C_{pk} 考虑还是 WC-SRSS 的分析, 设计均未达到要求。因此该设计需要优化, 如果以提高零件的精度来达到要求, 提高多少或者对哪些零件重新设计都带有盲目性。 6σ 公差设计方法告诉我们只有提高过程能力减少变异或者合理分配公差才是切实可行的。

第二步: 优化

由于用动态分析 (C_{pk}) 得到的装配概率最低 ($Z_{crit} = 3.23$), 故采用动态分析法作为优化基础。其公式表达为^[15]:

$$\text{首先根据 } Z_{crit} = \frac{F - G_{nom}}{\sigma_{Gk}} = \frac{F - G_{nom}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (T_i B_i / 3C_{pk_i})^2}}$$

得到全部尺寸的联合方差

$$\sum_{i=1}^m (T_i B_i / 3C_{pk_i})^2 = \left[\left(F - \sum_{i=1}^m N_i V_i B_i \right) / Z_{crit} \right]^2 \quad (3)$$

然后根据分配权重系数 A_i 来计算各个尺寸分配到的联合方差

$$E_i = A_i \left[\sum_{i=1}^m (T_i B_i / 3C_{pk_i})^2 - \sum_{i=1}^m \sigma_{i_B}^2 \right] \quad (4)$$

分配完各个方差后就得到各相关尺寸的优化公差

$$T_i = 3C_{pk_i} \sqrt{\sigma_{i_B}^2 + E_i} \quad (5)$$

根据功能要求及最好的工程判断, 决定给以相关的尺寸 C_3 和 C_8 安排公差以达到 6σ 的质量水平: $A_3 = 0.2$, $A_8 = 0.8$ 。根据公式 2、3、4 得到优化的公差为: $T_3 = 0.005 \text{ mm}$, $T_8 = 0.011 \text{ mm}$

如果零件 8 的过程能力提高为 $C_p = 2$, 同第一步的计算, 不需优化公差所得到的设计就满足 6σ 要求。

第三步: 结果验证

表 2 优化后增加的加工成本

此例优化结果的优势是显而易见的。原来的工艺是采用修配, 试装配后, 对于每个零件 3 必须单独加工, 而且加工余量很不稳定, 大小不一, 这使批量生产的效率难以提高。其钳工装卸成本大约是 4 元 / 件, 磨床加工成本大约是 10 元 / 件; 优化后所增加的加工成本 (10 元 / 件)

	零件 3	零件 8
原来的公差	0.011	0.017
优化的公差	0.005	0.011
增加的加工成本 (元 / 件)	2	8

如表 2 所示, 但无需修配, 仅需安装成本约 2 元 / 件。仅从成本比较, 优化的公差设计就节约成本大约 2 元 / 件 ($10 + 4 - 10 - 2 = 2$); 从时间上来考虑, 由于优化公差设计其装配概率达到了六西格玛水平, 相应地大大提高了装配的效率, 保障了工作的连续性; 从质量角度来看, 六西格玛的质量水平所带来的不仅仅是装配质量的巨大改进, 更重要的是方法思想

上的改变。

第四步：总结

从以上分析可知，只要给出 Z_F 、 N_i 、 C_{pk} 、 A_i ，就可推导出一系列的优化公差值来满足 6σ 要求；同时比较可看出，面向可制造性设计和减少变异对于一个高质量的产品是多么重要。从短期来讲，六西格玛公差设计增加了利润，从长远看来，高质量和高效率必将给企业带来巨大的潜在收益。至于具体采用何种方法来优化，需根据各种分析方法得到的结果及合理的统计推断、可靠的工程判断和大量的生产实践。

3. 结论与展望

本案例以公差设计为媒介通过装配实例展示了如何将 6σ 的质量水平从一开始就设计到产品中去。

首先从设计方法角度来说，高质量、低成本的产品是通过应用并行质量工程的思想、采用 DFM 的理念和方法以及从产品设计阶段就建立起 6σ 质量标准得到的。其次，应用该方法所设计的产品达到了 6σ 水平；设计过程中有意避免了变异并考虑过程漂移，所得到的设计不仅是统计优化的，而且装配成功概率将不会随时间而改变。最后，这一过程以过程数据和指标（ σ 、 C_p 等）为设计向导来优化可量化的加工过程及性能，因而所创建的 6σ 设计是稳健的，也可以说，基于过程能力而创建稳健设计比在制造阶段跟踪并减少变异容易得多。

6σ 公差设计方法为在并行工程环境中面向可制造性设计提供了一种评价产品设计的方法，同时也为公差设计提供了理论基础和指导原则。在柔性的制造系统中这种能力更加有用，这样就能够适应不断变换的市场需求、抓住机遇。因而 6σ 公差设计方法不仅受到广泛关注，而且将会在制造业起到更加重要的作用。

4. 参考文献

- [1] Marks, C.J. 1953. Tolerance charts control production machining. *Am. Machinist* 97(5): 114-116.
- [2] Pike, E.W. & Silverberg, T.S. 1953. Assigning tolerances for maximum economy. *Machine design*: 139-146.
- [3] Wu, C.C., Chen, Z.N. & Tang, G.R. 1998. Component tolerance design for minimum quality loss and manufacturing cost. *Computers in Industry* 35: 223-232.
- [4] Chase, K.W., Greenwood, W.H., Loosli, B.g. & Hauglund, L.F. 1990. Least cost tolerance allocation for mechanical assemblies with automated process selection. *Manufacturing Review* 3:49-59.
- [5] Dong, Z. 1997. Tolerance synthesis by manufacturing cost modeling and design optimization. Zhang, H.C.(ed.) In *Advanced Tolerancing Techniques* 233—260. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Myers, R.H. & Montgomery, D.C. 1995. *Response Surface Methodology---Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York: Wiley Series in Probability and Statistic.
- [7] 陈立周编著. 稳健设计. 北京:机械工业出版社,1999.12.
- [8] Kim, Y. J. Design optimization issues in off-line quality engineering systems. Doctor dissertation. December 2000, 40-41.
- [9] Jeang, A. & Hun, C.Z. 2000. Process parameters determination for precision manufacturing. *Qual. Reliab. Engng. Int* 16: 33-44.
- [10] Al-ansary, M.D. & Deiab, I.M. 1997. Concurrent optimization of design and machining tolerances using genetic algorithms method. *Int.J.Mach.Tools Manufact*, Vol.37(12): 1721-1731 1721-1731,1997.

- [11] Jeang, A. 1999. Robust tolerance design by response surface methodology. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 15:399-403.
- [12] Kusiak, A. 1993. *Concurrent Engineering : Automation , tools and techniques* . New york: John Wiley & Sons , Inc.
- [13] Chou, C.Y. & Chan, C.L. 2000. Bivariate tolerance design for lock wheels by considering quality loss. *Qual. Reliab. Engng. Int.*; 16: 129–138.
- [14] Chang, T.L. June 2002. Six Sigma : A Framework for Small and Medium-Sized Enterprises to Achieve Total Quality . *Doctoral Dissertation*.
- [15] Harry, M.J. & Stewart, R. 1988. Six Sigma Mechanical Design Tolerancing .Motorola Inc.
- [16] Badham, R., Couchman, P. & Zanko, M. 2000. Implementing concurrent engineering. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, Vol. 10(3): 237-249.
- [17] Belloy, P & Foucard, E. 2000. Roughness and Materials in Concurrent Engineering Systems. *Computational Materials Science* 19: 166-169.
- [18] Juran, J.M., Gryna ,F.M., & Bingham, R.S. 1979. *Quality Control Handbook*. New York :McGraw-Hill Book Co.
- [19] White, K.P & Systems, J. 1998. Systems Design Engineering. *Inc. Syst. Eng* 1: 285.302.