

# 液压马达的公差分析研究

夏天,周燕飞,张翔,王立超

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**常规的线性尺寸链计算方法可以用于液压马达的公差分析,但忽视了形位公差对于液压马达装配精度产生的影响。通过运用公差原则,考虑液压马达中形位与尺寸之间的关系,决定形位公差的增减性,利用蒙特卡洛模拟法随机抽样进行计算机模拟,模拟实际表面的偏移,验证形位公差对尺寸链的影响。

**关键词:**液压马达;形位公差;装配精度;公差分析

**中图分类号:**TH137.51 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)01-0044-03

## Tolerance Analysis of Hydraulic Motor

XIA Tian, ZHOU Yanfei, ZHANG Xiang, WANG Lichao

(College of Mechanical and electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Conventional linear dimension chain calculation method can be used for tolerance analysis of motors, but the influence of shape and position tolerance on assembly accuracy of motors is neglected. By using tolerance principle and considering the relationship among shape, position and size in motor, the increase or decrease of the shape and position tolerance is determined. Monte Carlo simulation method is used to simulate the displacement of real surface and verify the influence of the shape and position tolerance on size chain.

**Keywords:** hydraulic motor; form and position tolerance; assembly accuracy; tolerance analysis

## 0 引言

液压马达的装配过程是其生命周期中极其重要的一个阶段。装配质量的好坏可以影响着液压马达的性能与效率,而在整个阶段中,装配公差又直接决定着液压马达的装配成功率以及经济性<sup>[1]</sup>。因此,为了获得理想的结果,设计者必须深入研究液压马达装配阶段的公差问题,从而提高液压马达性能,降低成本。

一般的装配就是指将实际零件进行组装安排的过程,装配结束后,可以利用真实的液压马达来实现产品的检验和评价。在此之后,任何对于液压马达的改动,都需要重新对零部件进行设计与制造。因此,如果液压马达装配公差设计得不合理,不仅不能满足装配准确度的要求,而且也会导致返工或修改,使得装配成功率降低,浪费大量人力、时间等,甚至会影响液压马达的安全使用与使用寿命,所以对液压马达进行公差分析。

公差分析,不仅可以用于分析装配尺寸链的公差,同时也可称为公差累积分析,是在装配体零部件的结构和尺寸变动范围都已明晰的情况下,计算封闭环的尺寸范围,它初始以二维图样为基础,利用尺寸链和公差带进行计算。这种传统的计算手段与方法,不仅工作量庞大,效率低,而且校核起来也十分困难,因此需要对计算方法进行优化。

公差分析有极值法和统计法。统计法以概率论为计

算的数学理论依据,针对组成环的分布特征,进行计算分析封闭环尺寸,与极值法相比,更具有实际性。

国内外学者做了大量的研究,SALOMON 参与研发的 FROOM 系统被用于二维尺寸链的公差分析<sup>[2]</sup>。TAGUCHI 通过“三种水平析因试验”计算出变量对应的函数以及各阶中心距,确定封闭环尺寸公差<sup>[3]</sup>。陈飞、徐学林对尺寸链中形位公差的应用有着大量的贡献<sup>[4]</sup>,张炜在此基础上对其进行了更为深入的研究<sup>[5]</sup>。

本文研究的是有关形位公差的具体公差分析,利用公差原则来处理形位公差和尺寸公差之间的关系<sup>[6-7]</sup>,通过使用极值法、蒙特卡洛法进行分析比较,在此过程中对于结果采用“ $3\sigma$ ”原则。

## 1 理论分析

装配公差分析时,如果是想要将形位公差作为组成环的一部分,就需要学会处理形位公差与尺寸公差的关系。

公差原则主要是用来分析形位、尺寸在尺寸链中的关系,准确地说,是利用相关原则来解决二者之间的关系。公差原则包含独立原则、包容原则、最大实体原则和最小实体原则。它们利用被测要素所要按照的界限不一样而进行辨别<sup>[8]</sup>。

包容原则用于确保孔、轴之间的相互配合,它对于公差配合的要求是很高的。包容原则利用最大实体界限来分析孔、轴的配合所要的间隙或者过盈情况。形位公差不

会对封闭环有着影响,在尺寸链的建立过程中,只需知道装配零部件的尺寸及公差,其对应的形位公差不需要放入尺寸链中。

独立原则是指图样上的相关公差都是各自独立的,它们之间没有相互关系,只要实现规定的要求即可。由于没有其特有的符号,一般情况如果没有标注其他原则,就可以认为是根据独立原则。尺寸公差只影响实际尺寸的改变,它将尺寸限定在确定的极限范围内,影响不到形状和位置公差。形位公差可以影响到零件的形状和位置,但和尺寸公差没有关系。在进行尺寸链的计算分析中,不仅要将尺寸公差放入其中,还需要将形位公差也作为尺寸链的一部分进行计算。

当零部件按独立原则进行设计分析时,形位公差上、下偏差如果是对称的,那么就可以将它作为增环或者说是减环,它们对封闭环的影响水平是一样的,它们的尺寸表示为  $0 \pm T$  (其中  $T$  为封闭环公差)。

## 2 计算方法

对于公差分析来说,可以选择两种方法来进行计算,第一种是极值法。极值法以零部件的完全互换性为出发点来进行分析计算,是利用各个组成环尺寸的最大值、最小值来求解封闭环的计算方式,即只分析组成环都是极限偏差值的情况。只要组成环的公差在允许的尺寸范围里,那么产品就是符合规范的。

极值法计算公式:

$$A_0 = \sum_{i=1}^m M_i - \sum_{i=m+1}^{n-1} N_i$$

式中:  $M_i$  为增环尺寸;  $N_i$  为减环尺寸;  $m$  为增环数;  $n$  为总环数,由上式得封闭环的极值公式如下:

$$X_{\max} = \sum_{i=1}^m M_{i\max} - \sum_{i=m+1}^{n-1} N_{i\max}$$

$$X_{\min} = \sum_{i=1}^m M_{i\min} - \sum_{i=m+1}^{n-1} N_{i\min}$$

极值法,是一种比较直接的计算方法,是指组成环尺寸都是处于最大或者最小极限值的情况。在尺寸链计算中,极限法能够完全保证产品的使用要求与规范。极值法考虑的极端情况,在试验中出现的概率几近为 0。使用极值法进行公差分析,会使零部件加工成本变大,经济性和实用性不是很好。极值法虽然简单准确,但也需要分析其适用范围和利害关系,因此极值法不是最优的方法。它可以应用于那些加工公差等级要求高、生产经济性差的重要产品中。

蒙特卡洛法<sup>[9]</sup>是以概率论为数学理论基础,通过对随机变量进行大量的统计实验,模拟随机数据来求解问题的数值方法。在机械加工中,生产加工出来的液压马达零件尺寸公差都根据正态分布。正态分布  $N(\mu, \sigma)$  的随机数与  $[0, 1]$  均匀分布的随机数可以相互转换,假定在  $[0, 1]$  上,有 2 个组成环尺寸(公差)的随机数  $R_1, R_2$ , 它们相互独立,则满足  $N(0, 1)$  的组成环尺寸的随机数  $R_1, R_2$  为:

$$R_{N1} = \sqrt{-2\ln R_1} \cos(2\pi R_2)$$

$$R_{N2} = \sqrt{-2\ln R_2} \cos(2\pi R_1)$$

相对应的正态分布  $N(\mu, \sigma)$  上的随机数  $T_1, T_2$  为:

$$T_1 = \mu + R_{N1} \sigma = \mu + \sqrt{-2\ln R_1} \cos(2\pi R_2) \sigma$$

$$T_2 = \mu + R_{N2} \sigma = \mu + \sqrt{-2\ln R_2} \cos(2\pi R_1) \sigma$$

当组成环的尺寸出现极值时,所求的封闭环尺寸也是极值。想要避免小概率事件的出现,就要对封闭环尺寸进行处理,选择采用“3 $\sigma$ ”原则,即对于随机数不在  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$  区间的值进行舍去。封闭环公差为:

$$T = 6\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu)^2}$$

$$A_{0\max} = \mu + \frac{T}{2} \quad A_{0\min} = \mu - \frac{T}{2}$$

式中  $A_{0\max}, A_{0\min}$  为封闭环极限值。

## 3 计算过程

本文以摆线液压马达摆线轮(图 1)为实例,进行实际数据计算与分析,采用独立原则来分析尺寸公差与形位公差之间的关系。

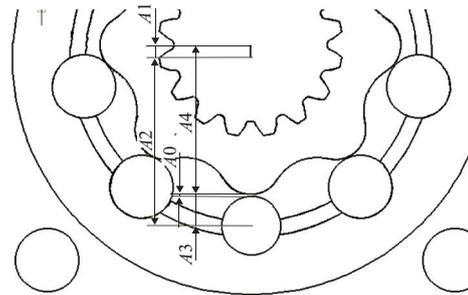


图 1 摆线液压马达结构图

不考虑几何公差的设计函数是:

$$A_0 = A_1 + A_2 - A_3 - A_4$$

考虑几何公差后的设计函数是:

$$A_0 = A_1 + A_2 - A_3 - A_4 - f_1 - f_2$$

尺寸链组成: 偏心距  $A_1 = 3.2_{+0.025}^0$ , 分度圆半径  $A_2 = 42.7_{+0.025}^0$ , 针轮半径  $A_3 = 8_{-0.035}^0$ , 转子半径  $A_4 = 37.9_{-0.025}^0$ , 针轮的圆柱度公差  $f_1 = 0_{+0.025}^0$ , 转子的面轮廓度公差  $f_2 = 0_{+0.02}^0$ , 将这 2 个形位公差作为减环来计算(图 2)。

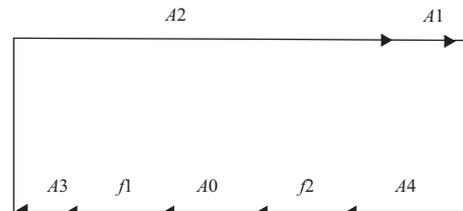


图 2 尺寸链

批量加工零部件的尺寸公差呈正态分布,某些几何误差的分布属于偏心分布,即形位公差按照瑞丽分布。

在 MATLAB 中编制简单的程序来实现公差分析的蒙特卡洛模拟。分别进行 1000 次、10000 次以及 50000 次抽样,其结果分别见图 3、图 4、图 5。数据整理以后的结果见表 1。

表 1 基于蒙特卡洛的公差计算结果

抽样次数/次	均值/mm	均值(几何公差)/mm	标准偏差/mm	标准偏差(几何)/mm	装配间隙/mm	装配间隙(几何)/mm	极限法/mm	概率法/mm
1 000	0.055 5	0.054 5	0.008 9	0.010 1	$0^{+0.082\ 2}_{+0.028\ 8}$	$0^{+0.084\ 8}_{+0.024\ 2}$		
10 000	0.054 9	0.053 9	0.009 4	0.010 5	$0^{+0.083\ 1}_{+0.026\ 7}$	$0^{+0.085\ 4}_{+0.022\ 4}$	$0^{+0.11}_0$	$0^{+0.09}_{+0.02}$
50 000	0.055 0	0.054 0	0.009 3	0.010 3	$0^{+0.082\ 9}_{+0.027\ 1}$	$0^{+0.084\ 9}_{+0.023\ 1}$		

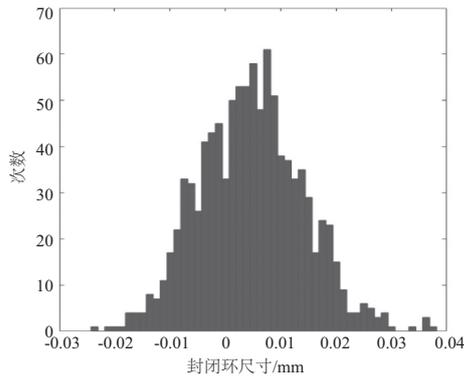


图 3 抽样 1 000 次的公差随机分布图

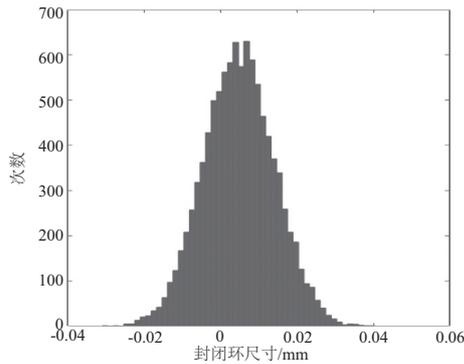


图 4 抽样 10 000 次的公差随机分布图

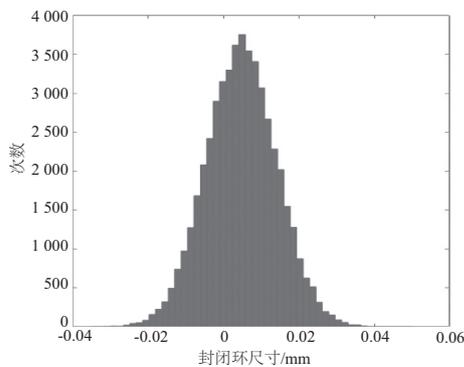


图 5 抽样 50 000 次的公差随机分布图

考虑几何公差以及未考虑几何公差的封闭环计算结果都需要遵循“3σ”原则。

从上述表格可以看出,进行公差分析时,考虑到形位公差计算出来的公差范围比没有考虑到的时候更大,如

图 6、图 7 所示,这是由于形位误差表现为配合表面形状上的变化。在线性尺寸链计算时考虑理想表面的接触方式,忽略了几何变动对接触点的影响。

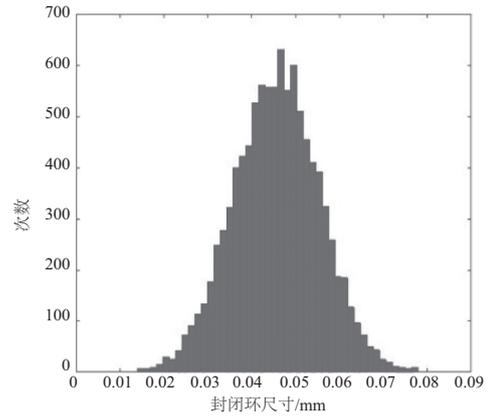


图 6 未考虑形位公差的封闭环公差

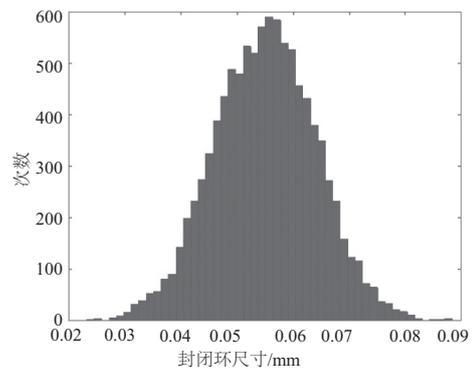


图 7 考虑形位公差的封闭环公差

## 4 结语

对于液压马达装配进行公差分析时,使用极值法、蒙特卡洛法进行理论计算和仿真分析后,可以看出,液压马达中的形位公差对其封闭环公差影响较大,在实际液压马达装配中,如果需要精确地进行分析计算,考虑形位公差的影响是很有必要的。如果没有将形位公差放入尺寸链的计算当中,求得结果也只是估算值,只有考虑分析了形位公差后,计算结果才会更加接近实际。同时引入了“3σ”原则,使得到的公差精度更高。

(下转第 86 页)

立基于 PCA 和 BP 神经网络的智能模型进行信息融合,充分挖掘数据信息,通过发动机实例验证了所提方法的有效性。此外,为了提高相似性度量的可靠性,利用退化模式信息优化参考模型库的构建方法,进一步改进相似性度量的计算方法,提升了飞行器服役部件的整体预测效果。本文方法同样适用于机器人关键部件的剩余寿命预测。

#### 参考文献:

- [1] SHEPPARD J W, KAUFMAN M A, WILMER T J. IEEE standards for prognostics and health management[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2007, 24(9): 34-41.
- [2] LEE J, WU F, ZHAO W, et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—reviews, methodology and applications[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2014, 42(1/2): 314-334.
- [3] TSUI K L, CHEN N, ZHOU Q, et al. Prognostics and health management: A review on data driven approaches[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(6): 1-17.
- [4] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.
- [5] 朱晓栋, 陈则王. 基于维纳过程的电池剩余使用寿命预测[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(4): 197-200.
- [6] RAMASSO E, SAXENA A. Performance benchmarking and analysis of prognostic methods for CMAPSS Datasets[J]. International Journal of Prognostics & Health Management, 2014, 5(2): 1-15.
- [7] WANG T, YU J, SIEGEL D, et al. A similarity-based prognostics approach for remaining useful life estimation of engineered systems[C] // International Conference on Prognostics and Health Management, IEEE, 2008: 1-6.
- [8] YOU M Y, MEMG G. A Framework of similarity-based residual life prediction approaches using degradation histories with failure, preventive maintenance, and suspension events[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2013, 62(1): 127-135.
- [9] ZHAO Z Q, LIANG B, WANG X Q, et al. Remaining useful life prediction of aircraft engine based on degradation pattern learning[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 164: 74-83.
- [10] 雷从英, 夏良华, 林智崧. 基于相似性的装备部件剩余寿命预测研究[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(4): 91-94.
- [11] 李琪, 高占宝, 李善营, 等. 变工况条件下基于相似性的剩余使用寿命预测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1236-1243.
- [12] 尤明懿. 基于状态监测数据的产品寿命预测与预测维护规划方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [13] BISHOP C M. Neural networks for pattern recognition[M]. [S.I.]: Oxford University Press, 1995.
- [14] RUMELHART D E, MCCLELLAND J L, GROUP C P. Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition, vol. 2: psychological and biological models[J]. Language, 1986, 63(4): 45-76.
- [15] SAXENA A, GOEBEL K. Turbofan engine degradation simulation dataset [EB/OL] [2013-09-12]. <http://ti.arc.nasa.gov/project/prong-ostic-data-repository>.
- [16] CHINAKAY P, WONGSA S. A PCA-based fault monitoring of splitter nozzles in gas turbine combustion chamber using exhaust gas temperature[C] // International Conference on Instrumentation, Control and Automation, IEEE, 2017: 120-125.
- [17] ENRICO Z, FRANCESCO D M. A data-driven fuzzy approach for predicting the remaining useful life in dynamic failure scenarios of a nuclear system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(1): 49-57.
- [18] DUBEY V K, SAXENA A K. A cosine-similarity mutual-information approach for feature selection on high dimensional datasets[J]. Journal of Information Technology Research, 2017, 10(1): 15-28.
- [19] SAXENA A, CELAYA J, SAHA B, et al. Evaluating algorithm performance metrics tailored for prognostics[C] // Aerospace Conference, IEEE, 2009: 1-13.

收稿日期: 2019-03-13

(上接第 46 页)

#### 参考文献:

- [1] 罗少敏, 王亚平, 邹衍. 某型手枪击发机构装配公差分析与信息化集成研究[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 132-136.
- [2] SALOMONS O W. Computer support in the design of mechanical Products, constraint specification and satisfaction in feature based design for manufacturing [D]. The Netherlands: University of Twente, 1995.
- [3] TAGUCHI G. Performance Analysis Design [J]. International Journal of Production Design, 1978(16): 521-530.
- [4] 陈飞, 徐学林. 尺寸链计算中对称度误差的处理方法[J]. 林业机械与木工设备, 2006, 34(1): 37-38.
- [5] 张伟. 具有形位误差的装配尺寸链的分析计算 [J]. 甘肃农业大学学报, 1997, 32(4): 327-330.
- [6] 刘燕德, 蒋育华, 欧阳爱国. 考虑形位误差的装配尺寸链计算探讨[J]. 江西农业大学学报, 2003, 23(1): 158-160.
- [7] 同长虹, 黄建龙, 董世芳. 在尺寸链计算中如何考虑形位公差——公差原则在尺寸链计算中的应用 [J]. 现代制造工程, 2008(1): 89-91.
- [8] 高磊. 基于蒙特卡洛法的公差分析及优化设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [9] 吴炳晖, 裘建军, 官娜. 基于蒙特卡洛法的结构可靠度预计[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 68-70.

收稿日期: 2018-10-29