

# DCC在航空发动机工艺尺寸链计算中的应用

刘明<sup>1</sup>,常海涛<sup>2</sup>,段燕<sup>1</sup>,刘尚成<sup>2</sup>

(1.中国航发南方工业有限公司,湖南株洲 412002;2.重庆诚智鹏科技有限公司,重庆 400010)

**摘要:**在航空发动机零件加工过程中,为了减小由于加工、设计和测量基准不统一而导致的误差累积和加工工序中形位公差的综合影响,从工艺尺寸链计算的难点闭环的判断和形位公差的处理分析入手,总结闭环判断的原则和判断技巧,应用尺寸链计算(Dimensional Chain Calculation,DCC)对航空发动机输出轴零件的基准转换和形位公差进行分析。结果表明:DCC软件相比传统的手工计算,具有计算效率高和精确度高的优势;形位公差的处理结果更准确,解决了工艺复合的尺寸链计算问题。

**关键词:**工艺尺寸链;形位公差;封闭环判断;计算机辅助公差分析;航空发动机

**中图分类号:** V260.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.04.018

## Application of DCC in Process Dimension Chain Calculation of Aeroengine

LIU Ming<sup>1</sup>, CHANG Hai-tao<sup>2</sup>, DUAN Yan<sup>1</sup>, LIU Shang-cheng<sup>2</sup>

(1.AECC South Industry Co.,LTD,Zhuzhou Hunan 412002, China;

2. Chongqing Chengzhipeng Technology Co.,LTD,Chongqing 400010, China)

**Abstract:** In the process of aeroengine parts machining, in order to reduce the error accumulation and the comprehensive influence of Geometric Tolerance in machining process caused by the inconsistency of machining, design and measurement, the principle and skill of closed loop judgment were summarized from the judgment of closed loop and analysis of Geometric Tolerance in process dimension chain calculation. The reference conversion and Geometric Tolerance of aeroengine output shaft parts were analyzed by Dimensional Chain Calculation (DCC). The results show that compared with traditional manual calculation, DCC software has the advantages of high efficiency and accuracy. The processing result of Geometric Tolerance is more accurate, which solves the problem of dimension chain calculation of process composite.

**Key words:** process dimension chain; Geometric Tolerance; close loop judgement; CAT(Computer-Aided Tolerancing); aeroengine

## 0 引言

由于航空发动机特殊的使用环境和安全性、可靠性的要求,其零件功能越来越集成,结构越来越复杂,精度越来越高,材料工艺性越来越差,制造技术要求越来越高<sup>[1]</sup>。在实际生产中经常遇到加工、测量和设计的基准不统一的情况,必须通过工艺尺寸链计算工序尺寸<sup>[2]</sup>;对于某些航空发动机的结构件,需要先装配后加工,其工艺尺寸链是装配和工艺复合的复杂尺寸链<sup>[3]</sup>;部分零部件要经过粗、精加工工序才能保证零件的精度要求,所以必然存在定位误差;为了保证零件的性能,在部分加工工序中还会有形位公差的要求。而传

统的手工计算无法计算复杂的(平面和空间)尺寸链和形位公差,已经无法满足现代航空发动机工艺尺寸链计算的需要。

在航空发动机零件加工工艺规程制定过程中,正确地绘制、分析和计算工艺过程尺寸链是保证航空发动机零部件加工精度的重要手段。随着计算机科学的迅猛发展,计算机辅助技术已经贯穿于产品策划、设计、工艺规划、制造和管理的全过程。Hillyard<sup>[4]</sup>首次提出利用计算机辅助设计确定零件的几何形状、尺寸和形位公差的概念;Bjorke<sup>[5]</sup>提出利用计算机进行尺寸链公差设计和制造;徐华<sup>[6]</sup>针对零件在同一方向上加

收稿日期:2019-08-24 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:刘明(1982),男,硕士,工程师,主要从事机械加工工艺及智能制造工作;E-mail:seal713@163.com。

引用格式:刘明,常海涛,段燕,等. DCC在航空发动机工艺尺寸链计算中的应用[J].航空发动机,2020,46(4):98-102. LIU Ming, CHANG Haitao, DUAN Yan, et al. Application of DCC in process dimension chain calculation of aeroengine [J]. Aeroengine, 2020, 46(4): 98-102.

工尺寸较多,并需多次转换工艺基准的情况,提出图表法解决工艺尺寸链的方法:把1个复杂的工艺过程用箭头直观地在1个图表内表示出来,并列有关计算结果;杨琳<sup>[7]</sup>研究了计算机辅助工艺尺寸链的原理,以用1个有向图来形象地描述各加工面之间的关系,采用十字链表存储结构描述所有的工序;程春红等<sup>[8]</sup>对工艺过程尺寸链中线性尺寸链计算程序的编制进行了论述,介绍了程序设计的思路和基本过程。工艺尺寸链计算的难点是对封闭环的判断和形位公差的处理。如果对封闭环判断错误,工序尺寸计算就会错误,最终导致零件合格率降低,成本提高。孙建<sup>[9]</sup>认为在判断封闭环时,凡是能直接加工得到的尺寸,都是组成环;不能直接加工得到,而要通过组成环间接得到的才是封闭环;陈培雄<sup>[10]</sup>将形位公差作为工艺尺寸链中的组成环或封闭环来分析形位公差要求在加工工艺中的影响。

本文根据实践经验提出判断封闭环的技巧及处理形位公差的一般原则,通过DCC软件在航空发动机输出轴工艺尺寸链计算中的应用,来探索计算机辅助工艺尺寸链计算软件在航空发动机零部件机加工工艺规程制定中的应用。以满足现代航空发动机工业对高集成度、高精度零部件加工的需要。

### 1 工艺尺寸链封闭环判断

工艺尺寸链计算的难点是确定尺寸链的封闭环。封闭环是尺寸链中设计、加工或装配过程中最后(自然或间接)形成的1个环,承担各组成环的累积误差,因此其公差值最大<sup>[11-12]</sup>。封闭环由工艺过程、加工方法和测量方法所决定,在加工时定位装夹的方式、对刀位置、走刀切削方法、刀具形状、测量方法、测量工具都可能使工艺尺寸链的封闭环发生改变<sup>[13]</sup>。封闭环的判断应该以实际加工和检测方法为依据,以封闭环定义为原则,辅助一些技巧来进行。现针对航空发动机零件机加工的特点,将封闭环判断技巧归纳如下。

#### 1.1 设计基准、加工基准与测量基准重合

设计基准、加工基准与测量基准重合时,通常加工余量为封闭环,如图1

所示。加工基准和设计基准都在左端,先粗加工到 $A_1$ ,再精加工到 $A_2$ ;  $A_1$ 和 $A_2$ 由前、后2道工序直接加

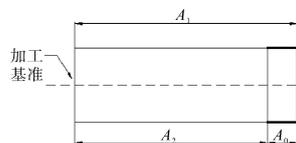


图1 设计基准与加工基准重合

工形成,  $A_0$  是间接形成的, 此时  $A_0$  为封闭环。

#### 1.2 加工基准和设计基准不重合

加工基准和设计基准不重合时,通常加工后位置到设计基准的标注尺寸为封闭环,加工位置到加工基准的尺寸为工序尺寸,如图2所示。表面A、B、C均已加工,现以A面为加工基准来镗孔,尺寸 $A_1$ 是镗孔后间接获得的尺寸,是封闭环;C平面为 $A_1$ 尺寸的设计基准,封闭环 $A_1$ 为孔中心到设计基准的设计尺寸。

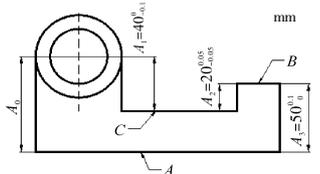


图2 加工基准与设计基准不重合

#### 1.3 测量基准与设计基准不重合

测量基准与设计基准不重合时,通常待测量表面到设计基准的尺寸是封闭环<sup>[14]</sup>,如图3所示。在车床上加工零件长度 $A_1$ ,加工大孔长度 $A_2$ ,加工后保证大孔底台肩面C到A端面设计尺寸 $A_0$ 。由于 $A_0$ 不易测量,加工中常用测量 $A_2$ 来控制孔底台肩面C到A面的尺寸 $A_0$ 。已知A为设计基准,B为测量基准; $A_0$ 通过测量 $A_2$ 间接保证,是封闭环; $A_0$ 是测量面C到设计基准A的尺寸,测量面C到测量基准B的尺寸 $A_2$ 为工序尺寸。

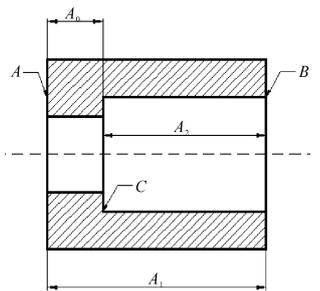


图3 测量基准与设计基准不重合

#### 1.4 在粗、精加工中的基础

在粗、精加工中,精加工如果以待加工表面为加工基准,且在以固定加工余量加工的情况下,适用技巧(2)加工后的表面到设计基准尺寸为封闭环;此时目标尺寸通常公差较大。但在实际加工中通常精加工后的尺寸精度较高,公差较小,以测量加工后的目标尺寸是否合格来判断精加工是否完成。此时测量基准与设计基准重合,适用技巧(1),所以加工余量才是封闭环。在粗、精加工中封闭环的判断需要根据封闭环的定义和误差累积的特点,综合考虑加工基准和测量基准2个因素来判断。

以1个案例来说明粗、精加工中封闭环的判断,如图4所示。零件加工

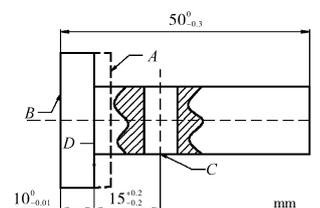


图4 粗、精加工

工序为:1 加工总长 50 mm (0, -0.3)—2 粗加工 A 端面至 10.4 mm (0, -0.2)—3 加工孔—4 热处理—5 靠磨尺寸 10 mm(0, -0.01)。求工序 3 的钻孔位置尺寸和工序 5 的磨削量范围。由于本案例中未给出工序 3 以哪个面为加工基准, 分别以 B 和 A 表面为加工基准来分析工艺尺寸链的封闭环。

(1)以 B 为加工基准。计算工序 3 尺寸时, 孔 C 的设计基准与加工基准不重合, 且尺寸(15 ± 0.2) mm 是工序 5 加工后间接获得的, 承担所有的累积误差, 所以尺寸(15 ± 0.2) mm 是封闭环。而该尺寸也是加工后位置到设计基准的尺寸, 符合第 1.2 节所述技巧。计算工序 5 磨削量范围时, 尺寸 10.4 mm(0, -0.2) 和 10 mm(0, -0.01) 由直接测量获得; 磨削量是由测量目标尺寸 10 mm(0, -0.01) 是否合格来获得的, 所以磨削量是封闭环。而且此时测量基准与设计基准重合, 符合第 1.1 节所述技巧, 加工余量为封闭环。

(2)以 A 为加工基准。计算工序 3 尺寸时, 孔 C 的设计基准与加工基准不重合。由于尺寸(15 ± 0.2) mm 是由磨削后间接保证的, 则该尺寸为封闭环。而该尺寸也是加工后位置到设计基准的尺寸, 符合第 1.2 节所述技巧。工序 3 尺寸、10.4 mm(0, -0.2) 和 10 mm(0, -0.01) 为组成环。计算工序 5 磨削量范围时, 可以采用(1)中粗、精加工的目标尺寸 10.4 mm(0, -0.2) 和 10 mm(0, -0.01) 来计算, 也可以使用孔的位置尺寸来计算。如果按照孔的位置尺寸来计算, 此时, 孔的设计尺寸(15 ± 0.2) mm 为间接获得, 为封闭环。工序 3 尺寸和磨削量为组成环。通过 DCC 软件公差分析功能验证, 采用(1)和(2)中的 2 种计算方法, 磨削量的计算结果一致, 说明磨削量不影响孔的实际位置, 这符合实际情况, 计算正确。

需要注意的是, 在加工 1 个表面同时产生 2 个或 2 个以上的尺寸时, 工艺上只能直接保证 1 个精度比较高的尺寸, 其余精度低的尺寸是间接保证的; 间接保证的为封闭环。另外, 工艺尺寸链中各组成环的加工误差会累积到封闭环, 因此其公差值最大。也可根据封闭环的公差累积特性合理设计加工工艺, 降低加工难度。

## 2 工艺尺寸链形位公差的处理

航空发动机零件功能和精度要求高, 关重件加工中通常要经过粗、精工序, 必然会在存在定位误差, 从而

导致形位误差。是否需要考虑形位公差对工序尺寸的影响, 主要基于形位公差与尺寸公差之间的关系, 只有真实确定二者都遵循共同公差原则的前提下, 才可分析该形位公差在尺寸链中对加工工序尺寸精度的影响。公差原则分为独立原则和相关要求, 而相关要求又分为包容要求、最大实体要求、最小实体要求和可逆要求<sup>[5]</sup>。需要根据具体情况分析是否需要计算形位公差对工序尺寸的影响。

## 3 航空发动机输出轴工艺尺寸链计算

某航空发动机输出轴中间工序如图 5 所示。 $A_1 = (135.2 \pm 0.025)$  mm, 已经加工; 装夹定位如图 5(a) 所示, 轴左端面为对刀基准, 车轴肩右侧至  $A_2$ , 保证轴肩厚度  $A_0 = (6.2 \pm 0.05)$  mm。加工后保证轴肩右侧端面跳动不超过 0.01 mm。计算工序尺寸  $A_2$ 。

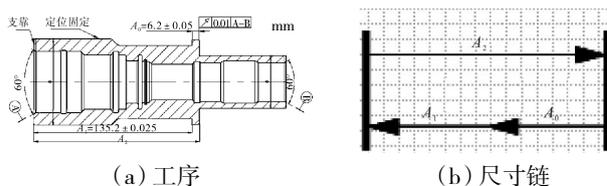


图 5 输出轴工序

由于轴肩厚度  $(6.2 \pm 0.05)$  mm 是轴肩两侧平面最高点的间距, 所以该尺寸已经包含端面跳动尺寸, 此处工序尺寸计算不需要考虑该形位公差。

计算工序尺寸  $A_2$  时, 如果只是简单的把  $A_1$  和  $A_0$  相加, 相当于以工序尺寸  $A_2$  为封闭环, 计算结果为  $(141.4 \pm 0.075)$  mm。但实际上由于  $A_0$  的设计基准与加工基准不重合,  $A_2$  不是封闭环。

### 3.1 闭环判断及环增减性判断

轴肩厚度  $A_0$  为加工间接获得的尺寸, 为该尺寸链的封闭环; 轴肩右侧到加工基准的尺寸  $A_2$  为工序尺寸。在传统手工计算中, 增减环的判断方法主要有 3 种: (1)概念法: 利用增减环的概念进行判断, 适用于环数较少的情况。(2)环绕法: 以封闭环上端为起点绕虚线, 将虚线视作“流水”, 流经所有组成环及封闭环, 若某组成环处的水流方向与封闭环初始设定“水流方向”相反, 则该组成环为增环, 反之则为减环。(3)列式法: 如能直接列出等式, 如  $A_0 = A_2 + A_3 - A_1$ , 其中  $A_0$  为封闭环, 则等式右边所带“+”的项目为增环, 而带“-”的项目为减环。

本文采用 DCC 软件自动计算传递系数来自动判

断各组成环的增减性,传递系数为各组成环对封闭环影响大小的系数。当传递系数为正时是增环,为负时是减环。对于复杂尺寸链增减性判断优势明显,可以大大节约工程师计算时间。通过计算,组成环 $A_2$ 的传递系数为正,为增环;组成环 $A_1$ 的传递系数为负,为减环。DCC自动计算传递系数及增减性判断结果见表1。

表1 DCC自动计算传递系数及增减性判断 mm

编号	基本尺寸	上偏差	下偏差	增减性
$A_0$	6.2	+0.05	-0.05	闭环
$A_2$	141.4	+0.025	-0.025	增环
$A_1$	135.2	+0.025	-0.025	减环

编号	公差	传递系数	贡献率	求解类型
$A_0$	0.1			已知
$A_2$	0.05	1.000	50.000	求解值
$A_1$	0.05	-1.000	50.000	已知

### 3.2 工序尺寸计算

在工艺尺寸链计算中通常采用极值法<sup>[16]</sup>,只有在大批量生产中,工序尺寸公差偏严导致不经济时,可用“概率法”。

以 $A_2$ 为封闭环和以 $A_0$ 为封闭环计算的工序尺寸 $A_2$ 对比。通过DCC公差分析功能验证2种工序尺寸,实际加工获得的轴肩宽度 $A_0$ 尺寸见表2。

表2 不同封闭环计算结果对比 mm

封闭环	工序尺寸 $A_2$	实际加工轴肩宽度 $A_0$
$A_2$	141.4 ± 0.075	6.2 ± 0.1
$A_0$	141.4 ± 0.025	6.2 ± 0.05

通过计算发现,简单相加获得的工序尺寸公差偏大,这会影响加工人员对加工误差的判断,从而影响产品的合格率。所以工艺尺寸链计算中封闭环的判断非常重要,需要引起工艺人员注意。

## 4 结论

航空发动机零部件的结构复杂,集成度高,精度要求高。存在加工基准、测量基准和设计基准不统一的情况,需要通过工艺尺寸链计算工序尺寸。在工艺尺寸链计算中,准确判断封闭环是计算正确的前提。本文通过分析工艺尺寸链的特点,得到以下结论:

(1)总结出封闭环判断的一些技巧,有助于工程师提升工艺尺寸链封闭环判断的准确性和效率。

(2)对于形位公差的处理,提出是否需要计算形

位公差对工序尺寸影响的一般原则,并在航空发动机输出轴案例中加以分析应用。另外,传统工艺尺寸链的计算通常采用手工计算,效率和精度低,容易出错;对于复杂尺寸链和形位公差要求无法计算。

(3)将DCC软件应用于航空发动机尺寸链计算中,不仅提高了计算的效率和精度,同时还可以解决航空发动机结构件中装配和工艺复合尺寸链计算和形位公差、角度公差和装配公差处理的难题。

### 参考文献:

- [1] 刘晓哲,吕泉,郑楠. 航空发动机结构件工艺技术及发展方向[J]. 机械工程师,2016(2): 217-219.  
LIU Xiaozhe, LYU Quan, ZHENG Nan. Technology and development direction of aeroengine structural parts [J]. Mechanical Engineer, 2016 (2): 217-219. (in Chinese)
- [2] 王炳恺. 浅析工艺尺寸链的解法[J]. 科技信息, 2011(11): 307.  
WANG Bingkai. Brief analysis on the solution of process dimension chain [J]. Science & Technology Information, 2011 (11): 307. (in Chinese)
- [3] 蒋君荣, 尹洋. 航空零件装配后的加工 [J]. 工艺与检测, 2012(2): 124-125.  
JIANG Junrong, YIN Yang. Machining of aviation parts after assembly [J]. Process and Inspection, 2012(2): 124-125. (in Chinese)
- [4] Hillyard C. Dimensions and tolerances in shape design [D]. England: Cambridge University, 1978.
- [5] BJORKE O. Computer-aided tolerancing [D]. Denmark: ASME Press New York, 1978.
- [6] 徐华. 工序尺寸与加工余量计算图表法 [J]. 机械制造, 2005(32): 116-118.  
XU Hua. Chart method for calculating process size and machining allowance [J]. Machinery, 2005(32): 116-118. (in Chinese)
- [7] 杨琳. 计算机辅助工艺尺寸链的分析与解算 [J]. 信息与电脑, 2011(10): 9-10.  
YANG Lin. Analysis and solution of computer aided process dimension chain [J]. China Computer & Communication, 2011 (10): 9-10. (in Chinese)
- [8] 程春红, 郝一舒. 计算机辅助工艺尺寸链计算方法 [J]. 机械制造, 2003, 41(12): 33-34.  
CHENG Chunhong, HAO Yishu. Computer-aided calculation of dimension chain [J]. Machinery, 2003, 41(12): 33-34. (in Chinese)
- [9] 孙建. 论工艺尺寸链中封闭环的判断方法 [J]. 教育现代化, 2018, 8(32): 355-357.  
SUN Jian. The determine method of closed ring in process dimension chain [J]. Education Modernization, 2018, 32(8): 355-357. (in Chinese)
- [10] 陈培雄. 工艺尺寸链中形位公差的计算 [J]. 科技风, 2014, (24): 102.

- CHEN Peixiong. Calculation of geometrical tolerance in process dimension chain[J]. TechnologyWind, 2014, (24): 102. (in Chinese)
- [11] 尹亮. 浅谈工艺尺寸链法解算工序尺寸及其公差 [J]. 南方农机, 2018, 49(17): 34.
- YIN Liang. Discussion on process dimension calculation and tolerance by process dimension chain method [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(17): 34. (in Chinese)
- [12] 王建平, 夏季, 曾国英. 快速判断工艺尺寸链中的封闭环[J]. 重型机械科技, 2006(2): 32-33.
- WANG Jianping, XIA Ji, ZENG Guoying. Quick judgment of closed ring in process dimension chain [J]. Heavy Machinery Science and Technology, 2006(2): 32-33. (in Chinese)
- [13] 杨胜利. 工艺尺寸链封闭环的确定方法 [J]. 机械工程与自动化, 2004(5): 23-25.
- YANG Shengli. How to establish the closed loop of technological dimension chain [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2004(5): 23-25. (in Chinese)
- [14] 胡凤英. 工艺尺寸链封闭环的查找 [J]. 机械工程师, 2008(7): 59-60.
- HU Fengying. Search for the closed ring of process dimension chain [J]. Mechanical Engineer, 2008(7): 59-60. (in Chinese)
- [15] 刘绍力. 基于直线尺寸链几何公差工艺尺寸链的求解 [J]. 设备管理与维修, 2017(17): 66-68.
- LIU Shaoli. Solution of process dimension chain based on geometric tolerance of linear dimension chain [J]. Plant Maintenance Engineering, 2017(17): 66-68. (in Chinese)
- [16] 张宪明, 王云海, 刘爱军. 基于极值法的圆柱面工艺尺寸链特征分析[J]. 河南科技, 2018(20): 70-72.
- ZHANG Xianming, WANG Yunhai, LIU Aijun. Characteristic analysis of technological dimension chain based on cylindrical surface [J]. Henan Technology, 2018(20): 70-72. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)