

一种基于证据推理的机械零件配合设计方法

Design Method of Mechanical Part Fitting Based on Evidential Reasoning

南京航空航天大学机电学院 邵晓明 安鲁陵
上海飞机制造有限公司航研所 孙小峰 卢 鹤

[摘要] 在设计机械零件轴孔配合(配合)时,可将影响配合类型选择的因素称为配合证据。阐述了配合证据的分类方法及各类配合证据的作用,在此基础上提出了一种基于证据推理的配合设计方法。综合使用模糊表示和精确计算的方法将主要配合证据矢量化,并结合其他各类配合证据进行计算和推理得到合理的结果。试验结果表明,该方法适用于一般机械零件的轴孔配合设计。

关键词: 机械零件 配合设计 证据 矢量化

[ABSTRACT] In the design of mechanical part fitting, the factors that influence the selection of fitting can be called evidences. After the introduction of evidences classification and effect, a method of mechanical part fitting based on evidential reasoning is proposed. The vector quantization of main evidences combines the use of fuzzy expression and exact computation. Then, with other evidences, the result can be figured out. Examples show that this method can be applied to general mechanical part fitting design.

Keywords: Mechanical part Design of fitting Evidence Vector quantization

近年来 CAD/CAM 技术发展迅速,已经广泛应用于各个领域,而作为其核心技术之一的计算机辅助公差设计(CAT)的发展却相对缓慢。公差几乎贯穿整个产品生命周期,决定着机器零件相互配合的条件和状况,直接影响产品的精度、性能、使用寿命和成本等,是产品设计中极为重要的一个环节。现行 CAD 系统的核心是几何造型,处理名义尺寸游刃有余,但是对于公差,则需要设计人员的经验和知识来处理,并手动标注在图纸上,使得现有 CAD 系统难以支持设计的后续工作,也使 CAD 与 CAM 难以实现真正的集成。因此, CAT 是国内先进制造技术发展过程中迫切需要解决的问题之一。

目前与 CAT 相关的研究已经广泛展开,并取得了一些成果。在计算机辅助公差配合设计方面,文献[1]介

绍了一种基于不精确推理的零件配合设计模糊专家系统,为配合辅助设计提供了一种切实可行的研究方法。配合类型的选择涉及到许多复杂的因素,如相对运动速度、承受力的大小、是否有附加紧固件、精度要求、工作温度、可拆卸性、基本尺寸、工件材料、表面粗糙度和配合件生产方式等。但文献[1]对于这些因素没有进行详细识别和区分,事实上,不同的因素对配合类型选择的影响程度和影响作用差别较大,对它们一视同仁可能导致推理结论的不准确。

法官断案是一个根据各种事实证据进行推理决策的过程,而配合设计很大程度上也是一个根据实际因素决策的过程,因此可以将上述因素称为配合证据,简称证据。在对影响配合类型选择的证据进行详细识别和区分的基础上,本课题提出了一种基于证据推理的配合设计方法,综合使用模糊证据和精确证据进行计算和推理。提出的这种配合设计方法仅适用于轴孔类的机械零件配合设计。

1 配合证据的分类

不同的证据对于配合类型选择的影响作用和程度是不同的,为了进行区分,应该将它们分类。本课题将证据分为3类:匹配证据、调节证据和基本证据。对它们的说明如下。

(1)匹配证据。该证据与每种配合类型的属性具有直接关联,它们直接影响配合类型的选择,是最为关键的一种证据。先将所有输入匹配证据矢量化,并组合形成匹配矩阵,然后与数据库中推荐配合类型匹配矩阵进行比较,寻找最合适的配合类型。

(2)调节证据。与配合类型本身属性并没有直接关联,但是对配合类型的选择具有重要影响作用。这类证据在利用匹配证据推理出配合类型的基础上,通过计算和分析调节证据对配合类型的影响,对(1)中的推理结果进行修正,使最终结果更准确、合理。

(3)基本证据。为前2类证据的计算和推理提供基本依据。分类后的证据如表1所示。

表1 证据分类

配合证据分类		
匹配证据	调节证据	基本证据
传递力大小	工作温度	配合直径(d_i)
定位精度要求	形状偏差大小	孔外径(d_i)
相对运动速度	粗糙度大小	轴内径(d_i)
精度要求	配合件生产方式	配合长度(L)
附加紧固件要求		轴材料
多支承性		孔材料
可拆卸性		
冲击载荷		

2 匹配证据的建立

本节的主要任务是描述匹配证据的矢量化过程和匹配矩阵的建立。

一般情况下,进行配合设计时不一定所有的证据都确定,有时仅能给出一些模糊不确定的证据,如配合件承受的力很大、转速很高等。捕捉设计者的意图,并将这些意图转化为匹配证据矢量是其关键问题和难点。

2.1 建立匹配证据集和权数集

2.1.1 建立匹配证据集

匹配证据集是由匹配证据组成的一个集合,是匹配矩阵的基础。设匹配证据集为 U ,有 n 个子证据集(由表 1 可知一共有 8 个匹配证据,所以 $n=8$),组成如下证据集:

$$U=\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}, \quad (1)$$

式中, u_1 为传递力大小, u_2 为定位精度要求, u_3 为结合件转速, \dots u_8 为冲击载荷。

其中各元素 $u_i(i=1, 2, \dots, n)$ 代表各个匹配证据,它们可以是模糊的,也可以是精确的。

2.1.2 建立匹配证据权数集

机械零件配合的用途是选择配合类型的基本依据,是保证选用准确性的前提。传递力时一般选用过盈配合;定心精度要求比较高时应选用过渡配合;有相对运动的时候只应选用间隙配合。因此,传递力大小、定位精度要求和配合件转速要比其余匹配证据更重要一些。

为了反映各个匹配证据的重要程度,对每个匹配证据给予一个相应的权数,由各权数组成匹配权数集:

$$A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}. \quad (2)$$

本课题中的权数采用德尔菲法确定,利用专家集体智慧来进行决策,其过程不再详述。

2.2 匹配证据矢量化

“传递力大小”证据的矢量化是所有证据矢量化方法中最复杂的,它包含了所有匹配证据的矢量化方法,因此以“传递力大小”为例建立匹配证据矢量。通过研究机械手册,抽取描述各种配合类型传力性能的词汇,定义“传递力大小”模糊集 $u_1=\{\text{小, 较小, 较大, 很大}\}$ 。

实际使用中,既可以输入模糊证据,也可以输入精确证据,无论什么证据,先需要将它们进行矢量化。

2.2.1 精确证据矢量化

在自然和社会现象中,大量随机变量服从正态分布,因此本课题主要选用正态分布作为精确证据矢量的隶属度函数。

当传递力大小已知时,采用以下公式描述:

(1)模糊数“小”,采用降正态隶属度函数分布:

$$\mu_{11}(x) = \begin{cases} e^{-[(x-F_1)/k_1]^2} & x > F_1 \\ 1 & x \leq F_1 \end{cases}. \quad (3)$$

(2)模糊数“很大”,采用升正态隶属度函数分布:

$$\mu_{14}(x) = \begin{cases} 1 - e^{-[(x-F_4)/k_4]^2} & x \geq F_4 \\ 1 & x < F_4 \end{cases}. \quad (4)$$

(3)其余模糊数均采用正态隶属度函数分布:

$$\mu_{1i}(x) = \begin{cases} e^{-[(x-F_i)/k_i]^2} & F_1 \leq x \leq F_4 (i=2, 3) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}. \quad (5)$$

其中 $F_i(i=1, 2, 3, 4)$ 和 $k_i(i=1, 2, 3, 4)$ 为隶属度函数常数。力的“大小”是一个比较模糊的概念,具有较大的相对性。如由于配合对象的结构和材料差异,2 000N 可能属于“较小”的力,也可能属于“很大”的力。因此 $F_i(i=1, 2, 3, 4)$ 的取值并不是固定值,而与基本证据有关。设传递力为 F ,对其进行估算:

$$F = \frac{\sigma \pi \mu L}{C}, \quad (6)$$

其中 $C = (\frac{C_a}{E_a} + \frac{C_i}{E_i})$; σ 为传递负载的有效过盈量; μ 为轴孔摩擦系数; C_i, C_a 分别为轴和孔的拉梅系数; E_i, E_a 分别为轴和孔的材料弹性模量。

观察(6)式右端,在基本证据确定的情况下 $\pi \mu L/C$ 是一个定值,对于每一个 $F_i(i=1, 2, 3, 4)$ 都存在 $\sigma_i(i=1, 2, 3, 4)$ 与其对应。因此,可以通过确定 σ_i 来确定 F_i 。 $\sigma_i(i=1, 2, 3, 4)$ 的值根据配合极限过盈表中的数据估算,由于篇幅有限估算方法不再详述。

2.2.2 模糊证据的矢量化

(1) 如果用户直接给定模糊条件“小”、“较小”、“较大”和“很大”中第 j 个模糊数, 则构造如下隶属度函数。

$$\mu_{ij}(x) = \begin{cases} 0.1 & i \neq j \\ 0.9 & i = j \end{cases}, (j=1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

(2) 如果对扭矩情况一无所知则隶属度函数可表示为:

$$\mu_{ij} = 0.5, (i=1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

(3) 在没有证据输入的情况下:

$$\mu_{ij} = 0, (i=1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

经过对匹配证据的矢量化处理, 得“传递力”证据矢量 $\mu_1 = [\mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{14}]^T$ 。通过使用类似的方法可以建立其余匹配证据矢量 $\mu_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{im}]^T$, 其中 m 为所有矢量的最大维数, 不足的用 0 补足。由所有匹配证据矢量组合成匹配矩阵:

$$T = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \dots & \mu_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \dots & \mu_{nm} \end{pmatrix}_{(m \times n)} \quad (10)$$

3 调节证据的建立

由于温度、形状偏差等情况的影响, 零件装配的间隙或过盈量往往会产生变化, 可能导致产品功能无法达到要求, 甚至失效。本课题选取工作温度、形状偏差大小、粗糙度大小和配合件生产方式 4 种影响配合精度的主要因素作为调节证据。

首先, 按照具体条件计算各个因素可能导致的间隙或过盈量变化值, 作为调节补偿量。在匹配证据推理得到配合类型后, 在轴基本偏差上加上补偿量, 使调节后的间隙或过盈量仍在设计要求范围内。由于每个调节证据的补偿量计算方法都不同, 使得计算情况比较复杂, 这儿仅以工作温度证据为例。国标 GB/T 1801-1999 中的公差配合数值表均以标准温度 +20℃ 为基础, 而大多数机械设备运行时, 其工作温度均高于标准温度, 设计不当可能导致产品性能劣化甚至失效。计算温度补偿量, 按下式估算:

$$\Delta_T = b(a_1 - a_2)d_f \Delta_t \quad (11)$$

其中, a_1 、 a_2 为轴和孔材料线性膨胀系数; Δ_t 为轴和孔的实际工作温度和标准温度 (+20℃) 的差值; d_f 为配合直径; b 为影响系数, 取 0.7 ~ 1.0。

如果轴材料为碳素钢、孔材料为青铜、配合直径为 50mm、使用温度 50℃, 按 (11) 式进行估算: $\Delta_T = 0.8 \times (11.12 - 17.53) \times 50 \times 30 \times 10^{-6} \approx -15.4 \mu\text{m}$ 。

假设原来是间隙配合, 则温度变化将导致间隙量增大 15.4 μm , 与极限间隙表比较可知这是一个不可忽略的

量, 其影响示意图见图 1。因此, 在配合设计时给予温度补偿很有必要。

4 推理策略及过程

通过对国标推荐的 106 种常用和优先配合类型进

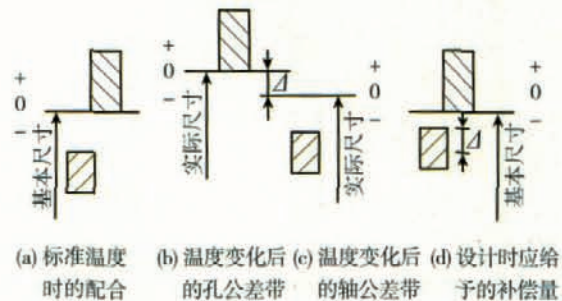


图 1 孔内径热变形量比轴径变形量大时对配合的影响
Fig.1 Change of part fitting when thermal distortion of hole internal diameter is larger than that of shaft

行整理和分析, 并对每一种配合类型的使用条件进行仔细研究, 分别为它们建立匹配证据矢量, 将所有匹配证据矢量组合成匹配矩阵:

$$T_k = [\mu_{k1}, \mu_{k2}, \dots, \mu_{kn}]^T, (k=1, 2, \dots, 106) \quad (12)$$

将每种配合类型的匹配矩阵 $T_k (k=1, 2, \dots, 106)$ 存入匹配数据库, 以便和输入的样本匹配矩阵 T 对比。

由用户给定证据, 设计算得到的样本匹配矩阵为 $T = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T$, 主要推理过程就是将样本匹配矩阵与匹配数据库中各推荐配合的匹配矩阵进行比较, 本课题选择择近原则作为推理策略。贴近度是衡量 2 个矩阵彼此靠近程度的一种标尺, 定义样本匹配矩阵与第 k 种 ($k=1, 2, \dots, 106$) 推荐配合匹配矩阵 T_k 的贴近度为:

$$\sigma(T, T_k) = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ a_i \sum_{j=1}^m [\mu_{kij} - \mu_{ij}]^2 \right\} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

式中, μ_{ij} 为 (样本矩阵) 第 i 个证据矢量的第 j 个隶属度; μ_{kij} 为第 k 个推荐配合的; a_i 为第 i 个匹配证据的权数。

按照择近原则推理策略, 若 $\forall h \in (1, 2, \dots, 106)$, 使 $\sigma(T, T_h) = \min(\sigma(T, T_1), \sigma(T, T_2), \dots, \sigma(T, T_{106}))$, 则样本的配合应是第 h 种推荐配合类型。

得到最合适的配合类型后, 运用调节证据对结果进行修正。设工作温度、形状偏差大小、粗糙度大小和配合件生产方式的补偿量分别为 Δ_T 、 Δ_G 、 Δ_R 和 Δ_P 。在所得配合类型的轴基本偏差上叠加 4 个补偿量之和 $\Delta = \Delta_T + \Delta_G + \Delta_R + \Delta_P$ 。如果 Δ 的值是正的, 表示间隙量应该增加或过盈量应该减小; 如果是负的代表间隙量应该减小或者过盈应该增加。假设配合直径为 450mm, 前面所得的配合类型为

H7/r6,估算得补偿量为 $\Delta=-80\mu\text{m}$,对已推理出的配合类型进行补偿后得到的结果为 H7/s6。

5 应用举例分析

利用 .NET2003+CAA 为开发工具,按照上文设计方法在 CATIA V5R17 平台上开发零件配合设计工具,并集成于 CATIA 工程图模块中。现以一齿轮装配设计为例进行实例应用,齿轮采用齿圈和轮蕊过盈连接的方式组合,齿圈材料为 40Cr,轮蕊材料为 ZG200-400,其结构尺寸如图 2 所示。

按图 3 方法启动设计工具,根据使用要求和实际情况,在对话框中输入初始条件(见图 4),经计算机推理得到最合适的配合类型为 H7/s6 或 S7/h6,与实际情况

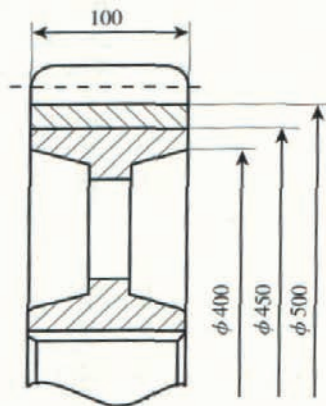


图2 齿轮结构示意图
Fig.2 Structure of gear

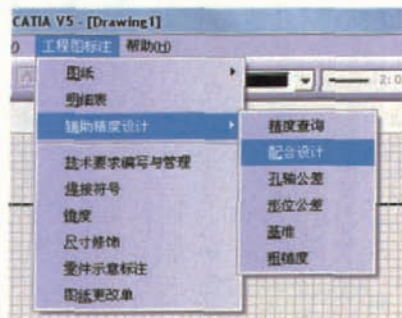


图3 工具菜单
Fig.3 Tool menu

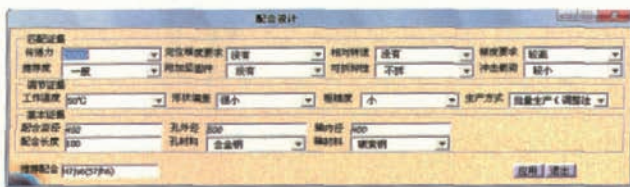


图4 用户输入证据
Fig.4 User input evidences

基本相符。

参考文献

[1] 杨将新,吴昭同.零件配合设计的模糊专家咨询系统.机械工程学报,1997,33(4):44-49.
 [2] 刘玉生,曹衍龙.ToIRM:面向三维CAD的公差建模系统.计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(8):1179-1184.
 [3] 罗哉.精密机械中孔轴最佳热配合理论及应用研究[D].合肥工业大学,2005.
 [4] 胡洁,熊光楞.基于变动几何约束网络的公差设计研究.机械工程学报,2003,39(5):20-26.
 [5] Davidson, Mujezinovi. A new mathematical model for geometric tolerances as applied to round surfaces. Journal of Mechanical Design, 2002,24:609-622.
 [6] 谢庆生.机械工程模糊优化方法.北京:机械工业出版社,2003.
 [7] 方昆凡.公差与配合实用手册.北京:机械工业出版社,2006.
 [8] 张帆.互换性与几何量测量技术.西安:西安电子科技大学出版社,2007.

(责编 玉龙)

(上接第 74 页)

参考文献

[1] 戴秀梅,何枫.高强度沉淀硬化不锈钢在飞机上应用.航空材料学报,2003(23)增刊:280.
 [2] 胡创国,张定华,任军学,等.开式整体叶盘通道插铣粗加工技术的研究.中国机械工程,2007,18(2):153-155.
 [3] Li Y, Liang S Y, Petrof R C, et al. Force modelling for cylindrical plunge cutting. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2004 (16):863-870.
 [4] 秦旭达,赵剑波,张剑刚,等.基于回归法的钛合金(Ti-6Al-4V)插铣铣削建模分析.北京工业大学学报,2006,32(8):737-740.
 [5] 皮克纳,伯恩斯坦.顾守仁译.不锈钢手册.北京:机械工业出版社,1987:300-303.
 [6] 邱轶兵.试验设计与数据处理.北京:中国科学技术出版社,2005:151-159.

(责编 岩石)

(上接第 76 页)

3 结束语

深孔及型腔的加工在起落架产品上应用非常广泛,在整个加工流程中占据重要地位,是提高机械加工效率,缩短加工周期的关键环节之一。随着科技的发展,整体锻造技术的应用及产品性能不断提高,深孔及型腔的加工难度越来越高,加工策略多种多样,但深孔加工原理相似。国内近年来通过引进和项目开发,逐步掌握了一些深孔加工的关键技术,整体技术得到了很大的发展。但深孔加工技术还需要不断改进和提高,从整体上提升加工能力。本文通过分析和汇总,提炼出了飞机起落架零件典型深孔及型腔的加工策略,对行业的发展和改进有着非常重要的意义。

(责编 玉龙)