

面向主动再制造的航空发动机涡轮叶片需求分析研究*

Research on Requirement Analysis of Aeroengine Turbine Blade for Active Remanufacturing

西北工业大学管理学院 蒋娟萍 梁工谦 张树娟

[摘要] 就产品失效后再制造难的问题,以多寿命周期理论为指导,归纳出面向产品绿色再制造的多重需求要素,并结合熵权法和 AHP 确定其权重;在探讨需求转换和冲突解决的基础上,形成基于 QFD 和 TRIZ 的面向主动再制造的产品需求分析模型。以某型航空发动机涡轮叶片的需求分析为例说明了此模型对产品绿色再制造的可持续设计质量的改进作用。

关键词: 绿色再制造 需求分析 质量功能展开 发明问题解决理论

[ABSTRACT] Aiming at the status of current production's hard remanufacturing after product failure, directing by multi-life cycle theory, triple requirement elements for the green remanufacturing products is summarized, and the entropy method and AHP is combined with to deal with multiple requirements. On the basis of exploring the requirement conversion and conflict resolution, the requirements analyzing model for product active remanufacturing based on QFD and TRIZ is put forward. Finally, the above method is validated by an example of aircraft acro engine turbine blade to illustrate the proposed framework in the sustainable designing quality improvement role for the green manufacture product.

Keywords: Green remanufacturing Requirement analysis Quality function deployment Theory of solution of inventive problem

绿色再制造是在综合考虑环境影响和资源消耗的情况下,以产品多寿命周期设计和管理为指导,以环境负面影响最小、资源利用率最高为目标,以先进技术为基础,产业化为手段,对废旧产品进行修复和改造等一系列技术措施和工程活动的总称^[1-4]。绿色再制造打破了传统的从“研制到报废”的开环单生命系统,使废弃物重获新生,实现了从“研制到报废”,又从“报废到新生”的闭环多寿命周期循环系统^[5]。相对于传统制造工

程而言,绿色再制造在保证产品性能的基础上,不仅考虑到产品在寿命周期末端的再制造问题,更关注废弃产品对环境的负面影响,以期实现可持续发展。但目前大多数新品设计时并未将环境(特别是再制造性)作为必要需求列入其中,这不仅造成了浪费,更对实现产品生命周期延拓带来了诸多不便。以航空发动机为例,改变其高价格和低寿命的现状是各国面临的问题^[6]。因此,要实现新品的使用价值最大化,应该从设计伊始就注重产品的主动再制造^[7],以实现循环经济为目标,获取全面的需求要素,最大限度地降低污染和消耗。

1 需求分析任务

绿色再制造的多生命周期包括了产品设计、制造、使用、报废、再制造、再使用而直至终端的周期循环过程,如图 1 所示。

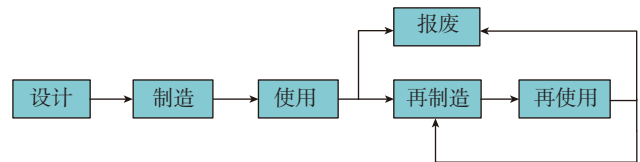


图 1 产品多寿命周期循环
Fig.1 Multiple life cycle of product

需求分析作为设计伊始,完成的是对产品从用户视角到设计者视角的转变,需求分析的活动包括需求的获取和需求的转变两部分。需求获取是通过调查等方式对目标客户群体访问,得知顾客对新品的要求和期望,并对其进行整理的过程。需求转化则是将顾客提出的需求转化为技术规格说明,是将顾客对产品的定性需求转化为设计所需的定量规格描述的过程。本文就需求分析过程展开研究,为后续设计和制造过程奠定基础。

2 基于 QFD 和 TRIZ 的需求分析模型

质量功能展开(QFD)是一种从质量保证的角度出发,以顾客需求为驱动,利用矩阵图解法将顾客需求分解到产品开发的各个过程中,而使最终产品能真正满足顾客需求的方法^[8]。QFD 的主要形式是质量屋,以实现需求到技术特性的转换,但面向绿色再制造的产品需求

* 国家自然科学基金(70771089)、教育部人文社科规划基金(12YJA630187)、陕西省软科学(2011KRM34)资助。

具有多重性,因此在利用 QFD 进行需求转换的过程中,技术特性之间难免会出现矛盾,反应在质量屋(HOQ)屋顶的自相关矩阵中可能存在冲突。针对 QFD 这一局限性,我们选取 TRIZ 理论。

发明问题解决理论(TRIZ)是关于系统创新的科学^[9],它通过定义设计中的矛盾,并结合矛盾矩阵和创新原理创造性的解决矛盾,从而在实现技术创新的同时确保了产品的质量。因此,本文在多寿命周期理论的指导下,将二者结合,建立模型如图 2 所示。

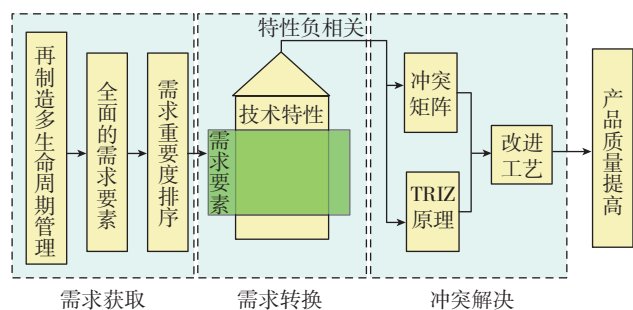


图2 基于QFD和TRIZ的需求分析模型

Fig.2 Requirement analysis model based on QFD and TRIZ

2.1 需求获取及重要度判定

2.1.1 需求获取

用户对产品的需求产生于产品的整个生命周期使用过程。文献[10]中指出,用户的需求应从用户、环境和操作这三个维度来获取需求。但这是对于传统制造的开环单生命系统而言,对于面向绿色再制造的多生命周期系统来说,产品的寿命还包括报废后的再制造过程。因此,本文指出在设计阶段除注重顾客、环境的需求要素外,还应将产品末端的再制造性考虑其中,从顾客、环境和再制造三重驱动入手,保证产品寿命末端的再制造能力,以实现产品质量的提高和循环经济的现实化。

首先,顾客需求能否得到满足是产品开发的关键,因此在顾客需求获取时要全面的认识顾客群,才能获取充分的顾客需求,使企业资源的优势得到充分的发挥。第二,绿色再制造强调在再制造过程中注重对环境的影响,特别的二次环境影响,即在产品在设计时注重环境友好性,即注重资源消耗和环境影响的降低^[11]。第三,再制造性是衡量产品再制造能

力大小的本质属性,产品的再制造性好,则再制造费用就会低、时间就会少,再制造产品性能就好,对节能、节材、保护环境的贡献也就大。所以,将再制造性纳入产品设计过程,通过设计来体现再制造性要求,既是再制造商的迫切需求,也提高了产品绿色度,更是实现产品可持续使用的客观需要。综上所述,全面的需求要素获取如图 3 所示。

2.1.2 需求重要度判定

较之传统的 QFD,本文需求来源广泛,因此确定不同种类来源的需求权重,使其能最大限度的满足多重需求,是整个产品设计的重要环节,因此提出一种基于熵权和层次分析法(AHP)相结合的需求权重确定方法。AHP 考虑专家的知识 and 经验,以及决策者的意向和偏好,但无法克服主观随意性较大的缺陷。熵权法能挖掘原始数据本身蕴含的信息,结果比较客观,两者结合起来,实现主观判断与客观数据相结合,从而提高权重确定的准确性。

熵的概念最初产生于热力学,后被引入信息论,用于描述系统状态的不确定性^[12]。本文设定需求要素有 n 个,按照 m 个等级来衡量,则可构建由 n 个需求要素和 m 个判定等级构成的一个 $n \times m$ 的判断矩阵:

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 r_{ij} 表示第 i 个要素在第 j 个等级专家访问或顾客调查中被判定为此等级的人数占总人数的比例。以 R 为研究系统,设 H_i 为系统中第 i 个要素的熵值,其表示为:

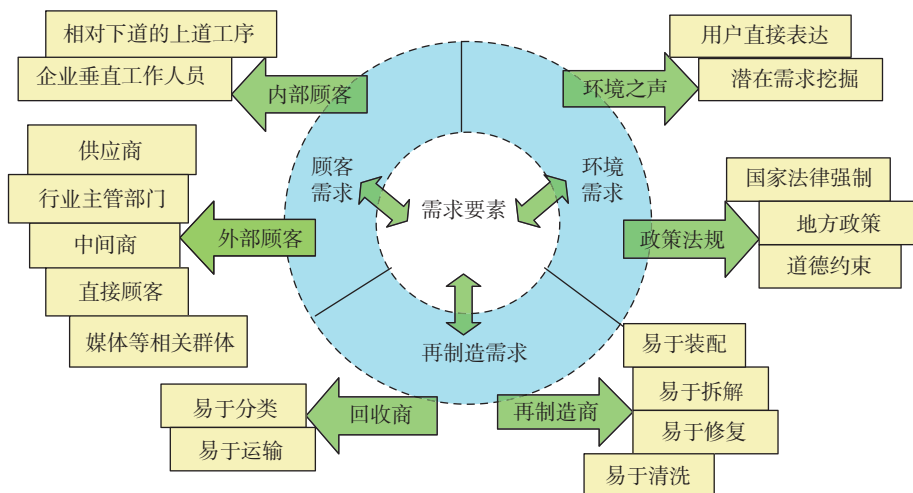


图3 需求要素获取

Fig.3 Obtaining requirement factors

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=0}^m \ln r_{ij}, \quad (2)$$

其中, m 为系统评语数; r_{ij} 满足 $\sum_{j=1}^m r_{ij}=1$, 当 $r_{ij}=0$ 时, $H_i=0$ 。

因此, 第 i 个需求要素的熵权为:

$$W_{ie} = \frac{1-H_i}{\sum_{i=1}^n (1-H_i)}, \quad (3)$$

其中, n 表示要素数。

可依次求取所有需求要素的对应的权重, 这样就得到了基于熵权法的需求要素的权重向量:

$$W_e = (w_{1e} \ w_{2e} \ \cdots \ w_{ne})。$$

AHP 从主观上来确定三重需求要素的重要度, 易于理解^[13]。但 Satty 提出的传统的 9 分位标度法时常会出现判断矩阵一致性不高, 各要素权重相差过大等问题。因此, 本文采用股票和其他经济领域经常使用的黄金分割比例, 即 0.618 为比例, 黄金分割标度法的具体含义见表 1 所示。具体步骤为采取对同一层次的所有要素进行两两比较的办法来建立判断矩阵, 一致性检验后即可确定各需求要素的权重为 W_a , 可得由层次分析法得出的需求要素的权重向量为:

$$W_a = (w_{1a} \ w_{2a} \ \cdots \ w_{na})。$$

所以, 对于需求要素集合 (X_1, X_2, \dots, X_n) , 由熵权法和层次分析法确定的权重分别为 $(w_{1e} \ w_{2e} \ \cdots \ w_{ne})$ 和 $(w_{1a} \ w_{2a} \ \cdots \ w_{na})$, 则第 i 个要素的综合权重为:

$$W_i = \frac{W_{ie} W_{ia}}{\sum_{i=1}^n W_{ie} W_{ia}}。 \quad (4)$$

表1 层次分析法标度含义

标度	含义
1	因素 i 和因素 j 相比, 同等重要
1.618	因素 i 和因素 j 相比, 重要
2.618	因素 i 和因素 j 相比, 明显重要
4.236	因素 i 和因素 j 相比, 强烈重要
标度的倒数	因素 i 和因素 j 的重要性之比为 a_{ij} , 则因素 j 和因素 i 的重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

2.2 需求转换

需求转化是将用户对产品的定性需求转化为设计制造所需的定量规格描述的过程。获取的需求要素只有将其转化为产品的技术特性才能继续用于后续的产品

开发, 新品能否最大限度地满足顾客需求取决于顾客需求转换的质量。质量屋 (HOQ) 是“需求转换”的工具, 它建立了顾客需求与产品特征的相关关系, 从而减少了客户需求和产品制造商之间存在的隔阂, 使恰当的产品能在正确的时间、以合适的价格占领市场。以下基于质量屋的需求要素转换过程:

步骤 1: 确定产品技术特性。产品技术特性来自于相关产品标准或者因需求要素而产生的技术需要, 一般情况下由企业技术人员或产品开发团队进行协商确定。

步骤 2: 确定需求要素和产品技术特性间的相关关系矩阵。规定以 1, 3, 9 数值序列分别表示需求要素和技术特性间的弱相关、中等相关及强相关。

步骤 3: 确定技术特性间的相关关系。规定以 +, - 分别表示技术特性间的正相关和负相关。

步骤 4: 技术性评估和质量设计。由相关人员根据企业现状和竞争对手相关产品的要求值对其进行设定。质量设计是企业综合考虑成本、技术和实际资源等约束条件的情况下设定的各方收益最高的可行性方案。

HOQ 为使用者洞察需求要素进而实现这些需求提供了一种系统的处理手段, 从中可以确定技术措施是否存在负相关(即冲突), 进而利用 TRIZ 工具解决冲突, 优化现有产品。

3 基于 TRIZ 的冲突分析及解决

通过 QFD 将绿色再制造多重需求要素带入了产品设计当中, 实现了需求的技术化。但由于面向绿色再制造的特殊性, 质量屋顶技术特性间的存在冲突的可能性加大, 对此运用 TRIZ 理论对其进行消解。

首先对存在负相关关系的技术特性进行冲突分析和判定, 其中技术冲突指系统中两个参数间的冲突, 物理冲突是指系统的同一个参数有两个相反的要求所构成的冲突; 其次, 根据不同种类的冲突查找相应的问题解决理论, 对冲突进行消解; 最后, 结合 TRIZ 创新原理并联系实际找出解决方案, 过程如图 4 所示。

4 算例分析

以某型航空发动机涡轮叶片的需求分析过程为例来说明文中提出的模型。涡轮叶片是关系到发动机性能的高负荷零件, 是发动机中高价值零件之一。但其数量多, 形状复杂, 对发动机的效率和寿命都具有重大影响, 正确合理地进行涡轮叶片的需求分析, 从设计之初延拓其生命周期并提高其性能和质量, 这对整台发动机的运行有着非常重要的意义。

(1) 利用图 3 所示来获取顾客、环境和可再制造性三重需求, 鉴于篇幅有限, 这里只列举主要的几项需求,

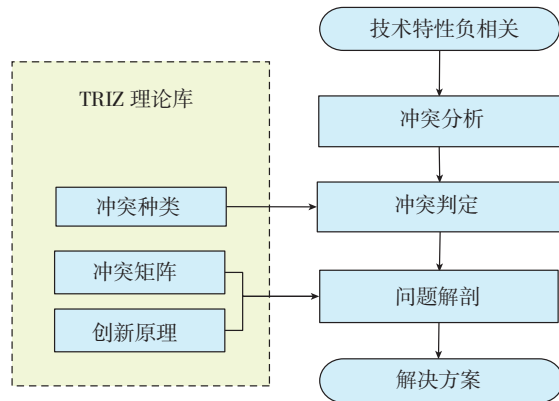


图4 冲突解决流程
Fig.4 Conflict resolution process

依次为耐高温高压、精度高、使用寿命长、安全度好、噪声小、无污染、易拆解组装、易回收。利用本文中 2.1.2 节需求重要度判定中提出的熵权法和层次分析法对各项需求要素的重要度进行计算,计算过程如下所示。

首先利用熵权法进行计算,选取以上 8 个需求要素为对象,按照稍微重要、明显重要、强烈重要和极端重要这 4 个等级来衡量,构建判断矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.11 & 0 & 0.02 & 0.04 & 0.2 & 0.06 & 0.21 \\ 0 & 0.09 & 0 & 0.08 & 0.11 & 0.36 & 0.22 & 0.42 \\ 0.14 & 0.25 & 0.07 & 0.15 & 0.22 & 0.44 & 0.26 & 0.25 \\ 0.86 & 0.55 & 0.93 & 0.75 & 0.63 & 0 & 0.46 & 0.12 \end{bmatrix}$$

由公式(3)可求得 8 项需求要素的熵权:

$$W_{ie} = (w_{1e}, w_{2e}, \dots, w_{8e}) = (0.2592, 0.0664, 0.2992, 0.16, 0.1032, 0.0407, 0.0467, 0.0246)$$

运用 0.618 标度法对上述需求要素两两进行比较,利用表 1 得到判断矩阵为 A 如下所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2.618 & 0.618 & 1.618 & 1.618 & 4.236 & 2.618 & 4.236 \\ 0.382 & 1 & 0.382 & 0.382 & 0.618 & 1.618 & 1 & 2.618 \\ 1.618 & 2.618 & 1 & 1.618 & 1.618 & 4.236 & 2.618 & 4.236 \\ 0.618 & 2.618 & 0.618 & 1 & 1.618 & 2.618 & 2.618 & 2.618 \\ 0.618 & 1.618 & 0.618 & 0.618 & 1 & 1.618 & 1.618 & 2.618 \\ 0.236 & 0.618 & 0.236 & 0.382 & 0.618 & 1 & 0.618 & 1.618 \\ 0.382 & 1 & 0.382 & 0.382 & 0.618 & 1.618 & 1 & 1.618 \\ 0.236 & 0.382 & 0.236 & 0.382 & 0.382 & 0.618 & 0.618 & 1 \end{bmatrix}$$

对其进行层次分析,求其最大特征值可知满足一致性要求。计算出权重为 $W_{ia} = (w_{1a}, w_{2a}, \dots, w_{8a}) = (0.213, 0.092, 0.225, 0.165, 0.118, 0.061, 0.081, 0.044)$ 。因此,利用公式(4)可计算出该需求要素集合的综合权重为: $W_i = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n) = (0.317, 0.350, 0.385, 0.151, 0.070, 0.014, 0.022, 0.006)$ 。

(2)在对上述需求要素分析的基础上,技术特性进行确定之后,利用质量屋建立需求转换模型(如图 5 所示),可推出呈负相关关系的技术特性。

图5 需求转换模型
Fig.5 Demand converting model

(3)涡轮叶片是航空发动机中工作环境最恶劣零件之一,航空发动机性能的提高必将导致涡轮叶片需具有更高的工作效率,但在高温高压的环境下愈快速工作必将导致材料损伤愈厉害,严重缩短叶片寿命,影响发动机长效工作。除此之外,叶片除承受持续温度差产生的热应力之外,还承受离心力、气动弯矩等机械应力,这些复杂的复合载荷要求其具有高的抗疲劳强度,将会导致系统的制造精度复杂化。

因此,用 TRIZ 理论对这些矛盾进行分析和解决,将存在负相关的技术特性对应于 TRIZ 理论中的工程参数,并结合矛盾矩阵表中找出处理相应问题的 TRIZ 原理,具体如表 2 所示:

(1)对于材料特性和工作效率之间的矛盾,解决的发明原理有 4 条:28 机械系统的替代、35 参数变化、10 预操作、23 反馈。经对各个原理的尝试后发现,10 预操作和 23 反馈这两个原理对解决此问题最有效。首先综合涡轮叶片的工作环境和制造成本费用等因素,在叶片表面预先加涂耐高温高压合金保护层;其次,采取反馈机制,叶片采取中空且表面取孔设计,并灌注冷气或冷液,当工作环境到限定状态时持续喷出冷物质形成气膜保护层,最大限度的降低损伤以延拓使用寿命。

(2)为了解决抗疲劳强度和制造精度之间的问题,

表2 层次分析法标度含义

待改善的特性	可能恶化的特性	推荐的 TRIZ 原理
工作效率	材料损伤度	28, 35, 10, 23
抗疲劳强度	制造精度	3, 35

有3局部质量、35参数变化这2条发明原理可供参考, 尝试后发现3局部质量对此问题最为有效。例如经测试在叶片和涡轮主体交汇处是叶片应力峰值地带, 可能会出现应力集中现象导致叶片损坏或者断裂。因此, 设计时, 在合理叶形的基础上对交汇处采取局部质量原理, 加强其材料的硬度和强度, 并对应力易集中部位采取表面细加工处理, 提高叶片的疲劳寿命。

通过实例可看出, 在新品设计之初综合考虑产品的主动再制造问题, 有效改善了因材料障碍或设计缺陷等造成的产品再制造难等局面, 为实现产品的生命周期延拓起到了重要作用。

5 结论

延长产品寿命周期, 提高产品再制造质量是再制造工程研究的重要方面。因此, 本文以产品多寿命周期理论为指导, 系统探讨了多寿命周期产品再制造过程的需求要素, 并对各个要素的权重采用基于熵权法和 AHP 相结合的综合权重, 针对技术特性间的冲突提出基于 TRIZ 的冲突解决过程, 最终建立了以 QFD 和 RTIZ 为方法的面向主动再制造的产品需求分析模型。通过对某型航空发动机需求分析的展开为例, 验证了从设计阶段就注重产品的可持续设计, 既延拓了产品生命周期, 又满足了顾客的质量期望, 增强了市场竞争力。

参考文献

[1] 徐滨士, 张伟, 马世宁, 等. 面向 21 世纪的绿色再制造. 中国表面工程, 1999, 12(4): 1-4.

[2] 田欣利. 再制造与先进制造的融合及其相关技术. 北京: 国防工业出版社, 2010: 19-22.

[3] Steinhilper R. Remanufacturing: the Ultimate Form of Recycling. Fraunhofer IRB Verlag, 1998: 12-20.

[4] 张安峰. 绿色再制造工程基础及其应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 13-30.

[5] 姚巨坤, 朱胜, 崔培枝. 再制造管理——产品多寿命周期管理的重要环节. 科学技术与工程, 2003, 3(4): 374-378.

[6] 包光平, 王瑛, 顾明星. 某型航空发动机再制造技术应用探讨. 航空维修与工程, 2009(6), 48-50.

[7] 刘涛, 刘光复, 宋许守, 等. 面向主动再制造的产品可持续设计框架. 计算机集成制造系统, 2011, 17(11): 2317-2323.

[8] Akao Y J. Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. Cambridge: Massachusetts Productivity Press, 1990: 8-20.

[9] 檀润华. TRIZ 及应用 - 技术创新过程与方法. 北京: 高等教育出版社, 2010: 145-171.

[10] 凌劲如, 邓家提. 支持顾客细分策略的用户需求分析方法研究. 工程设计, 2000(2): 10-13.

[11] 李聪波, 刘飞, 曹华军, 等. 绿色制造模式及其实施方法. 北京: 科学出版社, 2011: 90-101.

[12] 邱冠华. 管理决策熵学及其应用. 北京: 中国电力出版社,

2011: 168-172.

[13] 罗绍伟. 基于熵权法和层次分析法的学科馆员服务质量模糊综合评价. 现代情报, 2009, 29(8): 43-47.

(责编 亿霖)

(上接第 117 页)

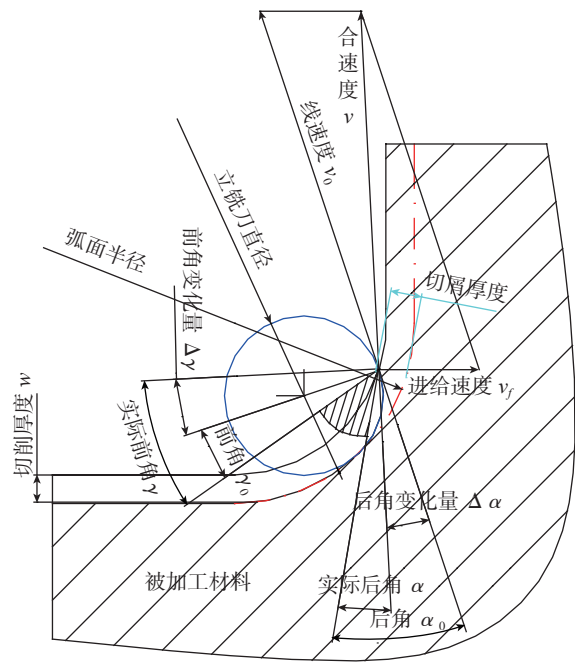


图2 曲面加工模拟图

Fig.2 Diagram of curve machining simulation

何参数, 该软件为数控立铣刀设计及应用提供了重要的参数计算工具。

实践证明, 该软件具有数控立铣刀动态几何参数计算的效率高、速度快以及运行稳定等优点, 已经在飞机制造生产线得以应用与验证。因此, 极大地提高了数控立铣刀图纸设计与切削加工的准确性与效率性。

参考文献

[1] 太原市金属刀具切削协会编. 金属切削实用刀具技术(第二版). 北京: 机械工业出版社, 2002.

[2] 袁哲俊, 刘华明. 刀具设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[3] 李儒荀. 刀具设计原理与计算. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1989.

[4] PO II И Н Л Р. 金属切削刀具. 喻怀仁, 陈世忠, 译. 北京: 机械工业出版社, 1986.

[5] 姚南洵, 王焯鸿, 陈志杰. 数学在刀具设计中的应用. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[6] 晶辰工作室. Visual Basic 6.0 参考手册. 北京: 电子工业出版社, 1999.

[7] 林永, 张乐强. Visual Basic 6.0 用户编程手册(第二版). 北京: 人民邮电出版社, 2002.

(责编 日午)