

基于在线检测的叶片加工余量自适应优化方法

张莹¹, 刘敏², 张定华¹, 吴宝海¹

(1. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安 710072;

2. 中航工业西安航空发动机(集团)有限公司 科技发展部, 陕西 西安 710021)

摘要:针对复合制造工艺背景下叶片毛坯形状复杂、余量分布不均的特点,提出基于加工中心在线检测的叶片装夹定位与余量优化方法。首先,根据叶片毛坯的工艺特性,建立了加工余量自适应优化的统一数学模型。然后,讨论了三类典型叶片包括无余量叶片、带余量叶片以及变形叶片组的定位与余量优化问题,并依次给出了适应不同约束条件的定位优化求解算法。最后,结合加工中心的在线检测方式,提出了叶片加工余量自适应优化的自动定位流程。算例分析结果表明,文中所提方法能够有效控制各种不同加工工艺制造的叶片毛坯的余量分布,使其自适应变化以满足实际工艺要求。

关键词:叶片;在线检测;装夹定位;余量优化;约束条件

中图分类号:TP391.7

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)11-0226-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.11.057

An Adaptive Approach for Machining Allowance Balancing for Blade Based on Online Measurement

ZHANG Ying¹, LIU Min², ZHANG Ding-hua¹, WU Bao-hai¹

(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of MOE, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Department of Technology, AVIC Xi'an Aero-engine (Group) Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: Aiming at the complex shape and uneven distribution allowance of blade blank under the background of composite manufacturing process, an approach to workpiece localization and allowance balancing based on online measurement is proposed. Firstly, according to the technological characteristics of blade blank, a unified mathematical model for machining allowance balancing is constructed. Then, the localization and allowance balancing problems of single blade with no allowance, with allowance and distortion blade groups are discussed and the corresponding solutions of localization transformation are also provided. Finally, with the online measurement of machining center, the implementation process for workpiece localization and allowance balancing of blade are given. Examples results show that the allowance distribution of different blade blank can be controlled effectively, which can satisfy the actual process requirement adaptively.

Key words: blade; online measurement; workpiece localization; allowance balancing; constraint condition

0 引言

叶片是航空发动机、汽轮机、水轮机等大型复杂装备的关键零部件,其加工质量直接决定着这些装备的整体制造水平和使用性能^[1]。目前,常常采用复合制造工艺的方式进行叶片的加工,如铸造毛坯+数控加工、锻造毛坯+数控加工以及焊接毛坯+数控加工^[1-3]。根据前期加工工艺的不同,叶片毛坯的形状变化多样、余量分布特征也各有不同。因此在叶片数控加工之前,需要采用简单、柔性以及精密的定位方式。随着数

字化检测技术与CNC控制技术的不断发展,计算机辅助定位方式成为了应用可能^[4-7]。利用加工中心的在线检测功能,测量叶片曲面的特征点集,通过定位优化算法的求解确定叶片的精确位置,同时实现加工余量的自适应优化,以满足精密数控加工工艺要求^[8]。

近年来,工件定位与余量优化方面的研究工作取得了重要进展^[4,6-10]。Xiong^[4]等基于工件定位算法,在三轴机床上开发实现了计算机辅助定位系统。Li^[10]等通过建立三维工件定位问题的统一模型,并应

收稿日期:2013-12-10

修回日期:2014-03-14

网络出版时间:2014-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51305353);中央高校基本科研业务费专项资金(3102014JCS05011);中国博士后科学基金(2012M512028)

作者简介:张莹(1981-),女,江西九江人,助理研究员,研究方向为计算机辅助几何设计、多轴数控加工及自适应加工技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140911.0942.008.html>

用不同的变换更新,给出了对称工件混合包容问题的求解方法。针对数字化检测技术是工件定位与余量优化的前提,学者们进行了一系列关于测量点集采样、路径规划以及模型匹配算法收敛性、可靠性等方面的研究^[5-10]。然而,目前的方法大多为通用算法,难以适应叶片毛坯余量分布的不均匀、多约束的情形,更无法适应叶片复合制造工艺背景下的加工要求^[11-14]。

为此,文中提出了基于在线检测的叶片加工余量的自适应优化方法。通过建立叶片加工余量自适应优化的统一数学模型,探讨了无余量叶片、带余量叶片以及变形叶片组三类典型定位与余量优化问题。结合加工中心在线检测方式,给出了叶片自动定位与余量优化流程,实现了不同叶片毛坯的精确定位及余量的自适应优化。

1 叶片加工余量自适应优化统一建模

由于叶片毛坯的形状复杂多样、余量分布各不相同,导致自动定位方式存在很大的差异,无法采用现有的单一优化模型及算法进行求解^[8]。

因此,文中建立了加工余量优化的统一数学模型,以适应不同前期工艺制造的叶片毛坯形状、位置以及加工余量的变化。

1.1 测量点集定位变换

定位变换一般定义为测量坐标系到工件坐标系的刚体旋转变换和平移变换 (R, t) ,其变换参数为 $x = (\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 。其中, α, β, γ 分别为绕 x_w, y_w, z_w 坐标轴的旋转分量, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为沿 x_w, y_w, z_w 坐标轴方向的平移分量。而旋转变换可由旋转矩阵 R 定义: $R = R_z(\gamma) \cdot R_y(\beta) \cdot R_x(\alpha)$ 。

平移变换由平移矢量 t 定义: $t = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 。设测量坐标系中的测量点集合为 $P = \{p_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$,对其作定位变换: $p'_i = R(x) \cdot p_i + t(x)$,即得到工件坐标系内的测量点集合 $P' = \{p'_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$ 。

1.2 加工余量优化模型

对设计表面进行等精度离散,并在设计表面上寻找测量点集合 $P' = \{p'_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$ 的对应点集合 $Q = \{q_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$ 。其中, q_i 为设计表面上与 p'_i 对应的最近点。设设计表面在 q_i 点的单位法矢为 $n_i, \delta \geq 0$ 为叶片加工表面余量(或半径补偿量),则通过下列等距变换:

$$q'_i = q_i + \delta \cdot n_i$$

可得到与设计表面点集合 Q 等距的加工表面点集合 $Q' = \{q'_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$ 。

定义有向距离函数:

$$d_i(x) = (p'_i - q'_i) \cdot n_i = ((R(x) \cdot p_i + t(x)) - q_i) \cdot n_i - \delta$$

将上述距离函数的平方和定义为目标函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N d_i^2(x) = \sum_{i=1}^N (((R(x) \cdot p_i + t(x)) - q_i) \cdot n_i - \delta)^2$$

同时,定义约束条件 $G(x)$:

$$x \in D = \{x \mid -\mu \leq g(d_i(x)) \leq \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N\}$$

从而,建立加工余量自适应优化的统一数学模型:

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{i=1}^N (((R(x) \cdot p_i + t(x)) - q_i) \cdot n_i - \delta)^2 \\ \text{s.t. } x \in D = \{x \mid -\mu \leq g(d_i(x)) \leq \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N\} \end{cases}$$

在上述模型的约束条件中, D 为参数 x 的可行域,由距离分布控制函数 $g(d_i(x))$ 及其上、下偏差 ε 和 μ 所定义($\varepsilon \geq 0, \mu \geq 0$)。当目标函数达到最小值时,得到的定位变换 (R^*, t^*) 称为最优定位变换,对应的参数 x^* 则称为最优变换参数。

2 典型叶片定位与余量优化问题

叶片加工余量优化的本质是建立测量坐标系与工件坐标系间的定位变换关系,并同时优化余量的分布,使得叶片毛坯最大限度地包容设计模型。下面以无余量叶片、带余量叶片以及变形叶片组为对象,分为三类典型问题逐一进行讨论。

2.1 无余量叶片精确定位

这类定位问题一般不定义约束条件,也称为常规定位或快速定位问题,对应可行域称为常规定位可行域 $D_0 = \{x \mid x \in R^6\}$,其问题关键在于测量配准点集的选取和算法的求解^[1]。

例如,在加工叶片某特征(如精锻叶片的阻尼台或榫板)时,利用已完成精加工的无余量叶身进行定位,以保证加工的一致性和连接处光滑过渡。

2.2 带余量叶片定位与优化

这类定位问题也称为包容定位问题。若存在已完成加工表面,但其又不足以可靠地约束零件方位时,与常规定位问题混合,演变为混合包容定位问题^[9]。例如,带余量的叶片毛坯或粗加工后的叶片加工定位,即属于此类问题。其关键是找出毛坯测量点与设计模型的对应点之间的刚体变换,并通过约束条件,使得设计模型尽量均匀地嵌在毛坯中,保证余量分布均匀^[1]。若考虑叶片加工的受力分析,还可施加余量非均匀分布的约束。一般采用迭代优化方法,反复比较毛坯测量曲面与设计曲面间的偏差,进行定位优化问题求解。针对这类问题,定义约束条件为以下几种形式:

(1) 区域公差约束条件 $G_1(x)$:

$$x \in D_1 = \{x | -\mu \leq d_i(x) \leq \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N\}$$

其中,当 $\delta = 0$ 时,区域范围为设计曲面,而 $\delta > 0$ 时区域范围为设计等距曲面; $\mu \geq 0, \varepsilon \geq 0, -\mu$ 表示对应点所在区域的下偏差, ε 表示区域上偏差。

(2) 余量存在约束条件 $G_2(x)$:

$$x \in D_2 = \{x | d_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, N\}$$

其中, $\delta = \delta_{\min}$ 表示毛坯的最小加工余量,它是约束条件 $G_1(x)$ 的特殊形式。

(3) 余量非均匀分布约束条件 $G_3(x)$:

$$x \in D_3 = \{x | d_i(x) \geq 0 \text{ 且} \\ -\mu \leq h(d_i(x)) \leq \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N\}$$

其中, $h(d_i)$ 为非均匀余量分布函数; $\mu = \varepsilon = \varepsilon_0$ 为足够小的某一正常数。

(4) 余量均匀分布约束条件 $G_4(x)$:

$$x \in D_4 = \{x | d_i(x) \geq 0 \text{ 且} \\ -\mu \leq d_i(x) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i(x) \leq \varepsilon, i = 1, 2, \dots, N\}$$

其中, $\mu = \varepsilon = \varepsilon_0$ 如上定义,它是非均匀分布的特殊情形。

图 1 给出了各类约束条件间的层次变化关系及对应的可行域包容关系。其中,常规定位是余量优化的基础,而在余量存在的情形下,还可进一步约束余量均匀分布或余量非均匀分布。随着定位至余量优化层次的提高,可行域空间逐渐缩小,甚至可能为空集,一般采用层次定位策略进行求解^[1]。

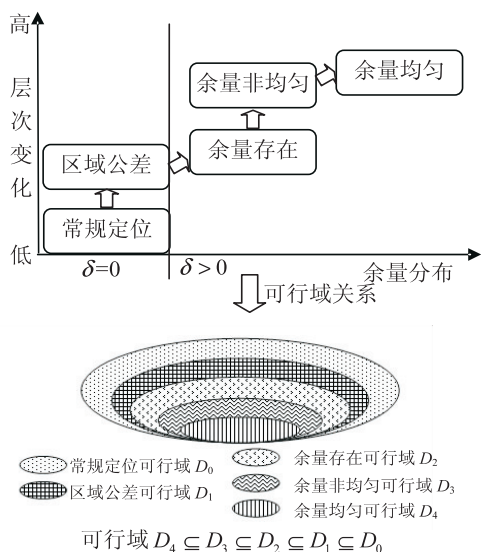


图 1 约束条件定义示意图

2.3 变形叶片组定位与优化

这类问题涉及整体结构的叶片零件加工中一组带余量、变形的叶片定位,是三类定位优化问题中最为复杂的。以焊接式叶片整体叶盘为例,由于焊接变形引起的各个叶片变形存在差异,在保证焊接毛坯与设计模型方位配准的同时,还必须增加单个叶片余量分布

尽可能均匀的约束条件,有时甚至采用分组定位的方法,一定程度上增加了优化算法求解的难度^[1,8]。

3 叶片加工余量自适应优化流程

叶片毛坯加工余量优化的定位方式能够有效改善刀具与机床的受力状态、减轻加工振动、改进表面质量、防止不当姿态加工而导致的毛坯报废。

基于加工中心在线检测方式,文中给出了具体的叶片定位实现流程,如图 2 所示。仅需采用一般夹具将叶片零件固定在加工中心工作台上,通过少量测量点的测量,快速准确地计算零件的实际位置状态。流程中包含了定位后自适应地修正机床零点坐标、刀位文件等具体的处理功能。该流程有效地集成了在线检测-定位-数控加工过程,形成了完整的自适应数控加工叶片定位与加工余量优化模块。

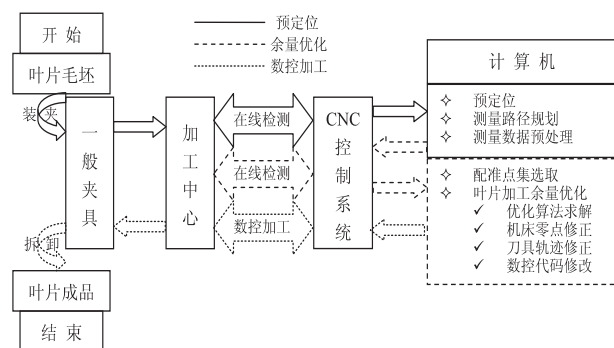


图 2 叶片加工余量自适应优化流程

当获得待加工零件所在机床(测量)坐标系中的实际相对位置后,通过自适应地修正机床零点或刀位文件,能够实现自适应方位变化的数控加工。

3.1 机床零点坐标系修正

当定位变换旋转矩阵 $R^* = I$ (单位矩阵)时,直接修正机床零点坐标,简单处理叶片定位。设原始机床坐标系为 $O_m-x_m y_m z_m$,由定位算法计算变换关系,定义新的机床零点 $O'_m = -R^{*-1} \cdot t^* = -t^*$,从而获得新的机床零点坐标系 $O'_m-x_m y_m z_m$ 。

在 CNC 控制系统中由指令 G92 设置新的机床零点坐标 O'_m ,基于此坐标系,导入原始的数控加工代码,实现自适应方位变化的叶片零件加工。

3.2 刀位文件修正

刀位文件是一系列刀位信息 $(x, y, z, i, j, k)^T$ 的组文件。其中,刀位点 $a = (x, y, z)^T$,刀轴矢量 $l = (i, j, k)^T$ 。根据叶片定位算法所得的工件坐标系到测量坐标系的定位变换关系,修正的刀位信息为:

$$a^* = R^{*-1} \cdot (a - t^*) = R^{*-1} \cdot a - R^{*-1} \cdot t^*, \\ l^* = R^{*-1} \cdot l$$

按照修正的刀位信息,由对应加工中心的后置处理算法生成修正的数控加工代码,并实施适应其方位

变化的数控加工。虽然刀位文件的修正涉及了数控编程过程,但是,这一过程易于自动处理,已成功集成至定位流程中,如图 2 所示。

4 算例分析

以某航空发动机精锻叶片阻尼台加工为例,首先在叶片设计模型上选取叶盆曲面的测量配准点集,其分布如图 3 所示。对于所选的配准点集施加已知的定位变换(如表 1 所示理论值),并添加随机噪声(μ, σ^2)=(0.01,0.01²)后作为仿真的测量数据,与叶盆曲面进行定位与优化,其迭代过程如图 4 所示。

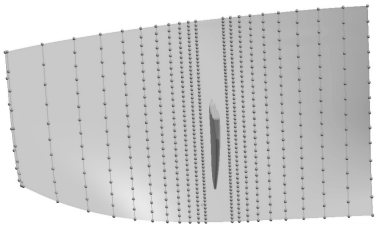
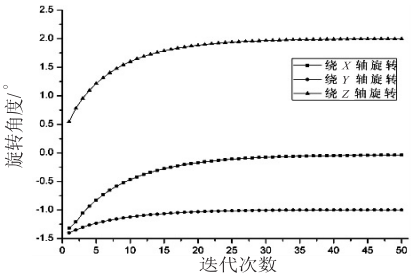
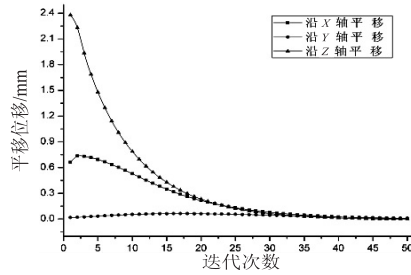


图 3 测量配准点集分布



(a) 旋转量变化



(b) 平移量变化

图 4 精锻叶片定位与优化迭代过程

叶片的定位优化实验结果如表 1 所示。比较实验结果与理论值可知,文中所提的叶片定位优化算法精度较高。将所得的定位变换(R^*, t^*)代入精锻叶片阻尼台加工的刀位文件中,修正生成实际加工所需的加工代码,能够实现适应叶片阻尼台方位变化的数控

表 1 叶盆曲面定位优化实验结果

	旋转参数/°	平移参数/mm
	(α, β, γ)	($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)
实验结果	(-0.0389 6, -0.998 20, 1.998 32)	(0.004 75, 0.008 93, -0.003 09)
理论值	(0, -1.2)	(0, 0, 0)

加工。基于在线检测的叶片定位优化方式不需要设计专用的夹具,在降低制造成本的同时,减少了人工操作,大大提高了精锻叶片定位-加工的精度及效率。另外,该方式还能应用于精锻叶片的榫头加工(叶身定位)、前后缘加工(榫头定位)等。

5 结束语

针对叶片毛坯复合制造工艺特点,提出了基于在线检测的叶片装夹定位与余量自适应优化方法。通过分析叶片毛坯余量分布特征,建立了加工余量自适应优化的统一数学模型,并讨论了三类典型叶片的定位与余量优化问题。结合加工中心的在线检测方式,给出叶片加工余量自适应优化的自动定位流程。算例分析结果表明,文中所提方法合理有效,能够较好地控制各种不同加工工艺制造的叶片毛坯的余量分布,以满足精密数控加工要求。

参考文献:

[1] 张莹. 叶片类零件自适应数控加工关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2011.

[2] Yilmaz O, Noble D, Gindy N N Z, et al. A study of turbomachinery components machining and repairing methodologies[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2005, 77(6):455-466.

[3] Gao Jian, Chen Xin, Yilmaz O, et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(11-12):1170-1179.

[4] Xiong Z H, Chu Y X, Liu G F, et al. Workpiece localization and computer aided setup system[C]//Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Maui, Hawaii, USA: [s. n.], 2001:1141-1146.

[5] Sun Y W, Xu J T, Guo D M, et al. An unified localization approach for machining allowance optimization of complex curved surfaces[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4):516-523.

[6] Yi Xu, Ma Limin, Li Zexiang. A geometric algorithm for symmetric workpiece localization[C]//Proceedings of the 7th world congress on intelligent control and automation. Chongqing: IEEE, 2008:6065-6069.

[7] Sun Yuwen, Wang Xiaoming, Guo Dongming, et al. Machining localization and quality evaluation of parts with sculptured surfaces using SQP method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(11):1131-1139.

[8] Zhang D H, Zhang Y, Wu B H. Research on the adaptive machining technology of blisk[J]. Advanced Materials Research, 2009, 69-70:446-450.

[9] 储云仙, 苟剑波, 吴洪, 等. 工件自动混合定位包容问题

此基础上进行 IP 封装。需要指出的是,传输层的 TCP 协议虽然具有差错控制机制,能够保证数据的可靠传输,但 TCP 的时延往往令人无法接受^[13];所以可以采用 UDP 协议来进行传输,其时延几乎可以忽略,更适合于媒体数据的传输。

H. 264 的数据流是由一系列的 NALU 组成的,对不同的 NALU 而言其数据量各不相同^[14]。H. 264 的 RFC3984 文档中给出了 3 种不同的 RTP 数据流的打包方法:

- (1)单个 NALU 单元包:一个 RTP 数据包只包含一个 NALU 单元,比较适合中等大小的 NALU 单元。
- (2)聚合包:一个 RTP 数据包中包含多个 NALU 单元,有 4 种组合方式,适合较小的 NALU 单元。
- (3)分片单元:一个 NALU 单元被封装在了多个 RTP 包中,适合封装较大的 NALU。

在编码时,时常会遇到这样的情况,很多 NALU 单元的大小大于 MTU,因为编码器往往不能根据当前网络中的 MTU 的大小来进行编码。当此种情况下的 NALU 在网络上传输时,在网络层上会对其进行分割,使每个单元最大不超过 64 kb^[15]。但是,对 IP 层分割的数据没有任何的保护措施,这使得很多余数据分割不等保护机制有关的内容无法使用,由于产生大量数据包碎片,增大了丢包率,进而降低了系统性能。针对该问题,本系统在传输控制程序中有针对性地进行了拆包处理。

4 结束语

文中针对 OMAP4430 平台多核系统给出基于 Web 的网络视频监控设计方案。采用多核系统平台使得系统的性能得到极大的提高,特别是当处理并发任务时,多核优势相对于传统的系统其处理效率更高。利用 H. 264 压缩算法对视频数据进行高效的压缩处理,研究 RTP/RTCP 相关协议,对实时传输的数据在应用层上进行了分割,提高了传输质量。

参考文献:

[1] Liu Yakun, Cheng Xiaodong. Design and implementation of
+ + + + +
(上接第 229 页)
的研究[J]. 机械工程学报,2000,36(1):45-49.
[10] Li Zexiang, Gou Jianbo, Chu Yunxian. Geometric algorithms for
workpiece localization[J]. IEEE Transactions on Robotics and
Automation,1998,14(6):864-878.
[11] Gao J, Gindy N, Chen X. An automated GD&T inspection system
based on non-contact 3D digitization[J]. International
Journal of Production Research,2006,44(1):117-134.
[12] Chatelain J F. A level-based optimization algorithm for com-

embedded Web server based on arm and Linux[C]//Proc of
2010 2nd international conference on industrial mechatronics
and automation. Wuhan:IEEE,2010:316-319.
[2] Szymanski J W. Embedded Internet technology in process control
devices[J]. IEEE Internet Computing,2000,34(3):301-308.
[3] Agranat I D. Engineering Web technologies for embedded applications[J]. IEEE Internet Computing,1998,2(3):40-45.
[4] 张洪涛,王 洋,毛洪飞,等. 基于 H. 264 的嵌入式视频监控
系统的设计[J]. 湖北工业大学学报,2010,25(5):11-13.
[5] 章民融,徐亚锋,尤晋元,等. RTP/RTCP 协议在视频监控
系统中的实现[J]. 计算机应用与软件,2006,23(1):79-81.
[6] 徐 成,谷吉芳,秦云川,等. 基于 RTP 的流媒体传输系统
框架研究[J]. 计算机工程与应用,2009,45(8):76-79.
[7] 何苏勤,杨美荟. 嵌入式视频监控系统实时性研究[J]. 计
算机工程,2009,35(4):235-237.
[8] Klimchynski I. Extensible embedded web server architecture
for Internet-based data acquisition and control[J]. IEEE Sen-
sors Journal,2006,6(3):804-811.
[9] Yang Jianfeng, Xie Yinbo, Chen Tianzhou. Research on Web
server application on multi-core embedded system[C]//Proc
of the international conference on embedded software and sys-
tems. Zhejiang:IEEE,2009:412-416.
[10] OMAP4430Processors [EB/OL]. [2013-02-18]. <http://www.ti.com/general/docs/wtbu/wtbuproductcontent.tsp?contentId=53243&navigationId=12843&templateId=6123>.
[11] 单海涛,方向忠. 基于 FFMpeg 的高清数字电影软件编码系
统的设计[J]. 信息技术,2007,31(1):96-99.
[12] 王彦丽,陈 明,陈 华,等. 基于 RTP/RTCP 的数字视频
监控系统的设计与实现[J]. 计算机工程与科学,2009,31
(3):58-60.
[13] 王建勇,刘慧念,卢 煜,等. 视频监控联网中的 H. 264 传
输关键技术研究[J]. 计算机工程与设计,2009,30(9):
2238-2240.
[14] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准—H. 264/AVC[M]. 北
京:人民邮电出版社,2005.
[15] 余兆明,查日勇,黄 磊,等. 图像编码标准 H. 264 技术
[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.

plex part localization[J]. Precision Engineering, 2005, 29
(2):197-207.
[13] Xiong Zhenhua, Wang M Y, Li Zexiang. A near-optimal pro-
bing strategy for workpiece localization[J]. IEEE Transactions
on Robotics,2004,20(4):668-676.
[14] Shen B, Huang G Q, Mak K L, et al. A best-fitting algorithm
for optimal location of large-scale blanks with free-form sur-
faces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003,
139(1-3):310-314.

基于在线检测的叶片加工余量自适应优化方法

作者:

[张莹](#), [刘敏](#), [张定华](#), [吴宝海](#), [ZHANG Ying](#), [LIU Min](#), [ZHANG Ding-hua](#), [WU Bao-hai](#)

作者单位:

[张莹, 张定华, 吴宝海, ZHANG Ying, ZHANG Ding-hua, WU Bao-hai \(西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 陕西 西安, 710072\), \[刘敏, LIU Min \\(中航工业西安航空发动机 集团 有限公司 科技发展部, 陕西 西安, 710021\\)\]\(#\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#)

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2014(11)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201411057.aspx