

# 南京工程学院

## 毕业设计(论文)外文资料翻译

原文题目：Micromilling strategies for machining thin features

原文来源：Proc. IMechE Vol. 220 Part C: J. Mechanical Engineering Science (2006.8)

学生姓名：李响楠 学号：231120320

所在院(系)部：工业中心

专业名称：机械设计制造及其自动化

# 薄壁零件的微铣加工方法

K Popov, S Dimov, D T Pham, and A Ivanov

卡蒂夫大学制造工程中心, 加的夫, 英国

于 2005 年 9 月 27 日出稿, 并于二月 2006.8 修订后发布。

DOI:10.1243/09544062JMES192

**摘要:** 在微型工程领域运用微细加工技术加工薄壁金属件是一个巨大的挑战。例如: 生产多管道微型结构, 微型机械器件和手术器械等。在微型工程中最常见的薄壁件是板肋结构。本文主要研究当所加工的微型工件包含薄壁结构时, 影响微铣加工可靠性的主要因素。通常情况下新的加工方法旨在减少影响零件质量的负面因素, 同时克服在传统微细加工方法下加工网状结构和肋状结构所产生的相关问题。为了验证方法的合理性, 本实验首先进行了手工编程, 自动生成相关的 CAM 模型, 最后进行了实际的薄壁件切削实验。

**关键词:** 微铣, 肋板结构, 薄壁件加工, CAD / CAM

## 一 引言

产品的小型化, 需要发展直接和间接的加工方法, 用于制造零件和模具, 包括薄壁零件加工功能的需求不断增长。在这项研究中, 一个薄壁加工的功能被认为是一个三维体, 其中几何尺寸, 厚度, 是显著 (超过七倍) 小于其他零件的。

加工薄壁件的一个可行方法是从一整块金属材料直接加工成为含有薄壁结构的零件。因为这种方法在很大程度上减少了复杂的后续装配工作, 成为加工微型单元的最有效的方法之一。从宏观角度看这种方法确实给零件的装配带来了方便, 然而从微观角度考虑, 这种方法却给零件的加工制造带来了许多困难。薄壁金属件的微铣削加工技术扩大了微型工程的应用范围如: 生产多管道微型结构, 微型机械器件和手术器械等有着重要的意义。

在微型工程中最常见的结构是板肋状结构。当应用微铣削技术加工肋状结构时, 被加工工件的加工表面是由侧铣形成的。与此不同, 当加工网状结构时加工表面是由立铣形成的。可靠的薄壁件微细加工策略的制定, 需要对影响微细加工质量的各种因素进行系统深入的研究。

从整体金属材料加工, 到含有薄壁结构的零件是生产加工, 阻碍这一方法广泛应用的障碍是切削加工的稳定性不足。因为肋状和网状结构越薄, 其刚度越小, 这就可能导致加工过程中出现振动, 从而影响加工过程的精度, 生产出不合格工件。微铣切削时产生的高频振动也可能使工件的表面质量的下降。由于所加工工件的尺寸很小, 加工之后进行修正几乎是不可能的, 而且这样做也不经济。

本文讨论了当所加工的微型工件包含薄壁结构时, 影响微铣加工可靠性的主要因素。使用新的加工方法减少这些影响零件质量的负面因素, 同时克服在传统微细加工方法下加工

微细网状结构和肋状结构所产生的相关问题。本实验首先进行手工编程，然后自动生成相关的 CAM 模型，最后进行了实际的薄壁件切削实验验证该方法的合理性。

## 二 研究现状

### 2.1 薄壁零件加工

众多研究者对影响宏观尺度下薄壁件加工的主要因素进行了研究。Tlusty 等人，确定了在高速铣削加工中的主要问题。为了提高该工艺的可靠性，提出了用切削刀具加工薄壁件的方法，加工方法可以应用在这种情况下。不幸的是，这样的方法不能被应用在微机械加工，因为切割工具与直径小于 300mm 使用。

Rao 提出了一种方法，用于加工薄网，无论是直接对机床或使用专门设计的固定装置都是支持的。因此，腹板的刚度将远高于轴向切削力。研究导致的振动是发生在薄壁加工过程中的主要影响因素。特别是对轴向和径向的切削深度，主轴转速，和刀具几何形状的影响进行了研究。

其他研究人员已经提出的模型模拟铣削加工条件的影响因素，以及在铣削过程中的特点。例如，克莱恩等人。提出用薄板和静力理论发展的有限元分析模型的端铣加工。开发了一种动态模型，用于模拟非常灵活的板状结构的外周铣加工。

此外，研究人员已经提出了些一般原则，在薄壁零件加工中应遵循的设计。特别是设计应该允许这样的功能，在加工过程中，应该符合这些原则。该技术通过 Tlusty 等人开发，加工薄壁零件基本上采用刚性的，工件的切割部分支持灵活的部分被切断。这原理也可以应用到薄壁零件加工，但是，有一个主要的差异，在相对于刀具的支承结构的方向。当加工肋板时，支撑结构应增加的零件的刚度。相比之下，对于加工薄壁时，应增加沿刀具轴的零件的刚度。

### 2.2 微端铣加工中一般存在的问题

微端铣的操作可以被认为是一种常规的端铣操作，特别注意的是加工过程中使用的刀具大小。特别是，每齿进给率之间的比值 (FT) 和刀具半径 (R) 的选择更高的微细铣削中应该保持相对较高的去除率。因此，在铣削加工中应力显著增加，比较那些在传统铣削，刀具寿命大幅度降低。一些研究人员实验了直径为 100 的刀具在硬金属加工中寿命短。

影响微铣削刀具寿命最重要的因素是与那些选定的切削条件有关。在传统的铣削的情况下，操作员通过监视或轮廓的变化来判断切削刀具的条件。不幸的是，他们无法直观的检测刀具的破损，由于其尺寸大小，产生的切屑和加工区域的冷却情况。此外，内部特性的变化，它是不可能看出变化的。因此，运营商是不能够调整微细操作只是监控切削过程，因此，加工中如果不及时发现刀具失效会造成浪费。

微细铣削中不同于传统的机械加工，有可供选择的加工参数手册。例如，如果建议的切削速度为传统的铝铣削加工。同时，微细铣削中，应特别注意在每个切端毛刺的形成。毛刺是不可存在的，要将他们去除主要是非常困难的。因此，它是非常重要的优化切削参数和加

工方法，以避免它们的形成。

不幸的是，现有的仿真模型在一个典型的传统的铣削操作不能直接应用在微细切削力。这些模型是必要的，以适应特定的切削条件下微加工过程中或新的模型来开发。例如，一个新的分析模型，提出了模拟微端铣操作。在这个新的模型中，切削力被认为是八个变量和一个系数的函数，而不考虑刀具的切削力。特别是下面的加工参数被认为是重要的：

- (a) 切削三要素：主轴转速、进给速度和切削宽度；
- (b) 切削方法有关的参数：刀具的切入口和出口角度，定义切削深度，和铣削的类型，向上或向下铣削；
- (c) 刀具的三个几何变量：刀具直径、螺旋角、切削刃数。

不难看出，在应用这一新的模型估计在微细切削力等优点。例如，如果进行切削加工大的进给量（更高的每转进给量），典型的微端铣，新的模型与一般模型预测的结果更接近真实的。如果每转进给量大于 0.1 时，正两种模型预测的切削力将会相差 15% 以上。本文将对以上这些影响切削力的重要参数进行讨论，从而总结出薄壁件微细加工的有效方法。

### 三 薄壁件的微铣削加工

为了成功的加工微型的薄壁结构必须注意一下两个问题：

1. 加工方法的选择应该考虑到特定的几何形状的组成部分。这包括切削深度的选择，在一定范围内的切削力要保持一致。
2. 主轴转速和进给速度应选择取决于工件，刀具材料，刀具几何形状，和加工方法的选择。

一般情况下在加工板肋结构时刀具直径和轴向切深度限制着切削宽度，此外应避免高频振动的发生。因此，为了遵循这些原则，必须进行一些轴向的加工步骤，从而保证板肋结构达到预定的厚度和深度。

开发加工，是专为微铣削薄壁特征的策略，需要考虑以下几个方面：

1. 应避免板肋结构在交接处以尖角过渡，在这种部位推荐用圆角从而避免应力集中而产生零件失效。
2. 应尽量避免在加工薄壁板肋结构时切削力方向的急剧变化，尤其在使用球头刀时更应注意这一点。
3. 切削力的轴向分量应在一定范围内，否则将容易引起工件振动影响加工。
4. 应采取特殊的措施保证刀具不发生损坏，因为微细加工所使用的刀具在切削过程中由于条件变化时极易损坏。

由于刀具具有圆角，在加工时产生了一组轴向切削力，这足以促使工件的振动的产生。由于刀具的圆角足以在板肋交界处产生圆角，因此不一定要使用球头刀作的切削刀具。如果在加工时完全使用球头刀则会造成材料去除率的显著减少，因为过渡部分的间距必须小于球头刀半径的一半从而避免尖角的产生。

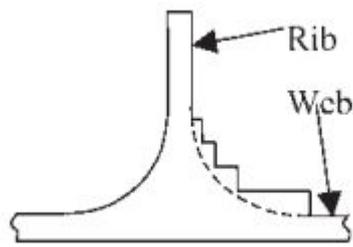


图 1

为了在避免震动的情况下对薄壁件进行切削通常有以下两个步骤。首先，要使用直径最大且大圆角刀具对工件进行加工，给接下来加工圆角预留出足够的加工余量。然后使用球头铣刀进行加工，形成光滑的圆角过渡。为了避免尖角，间距之间的距离应该小于刀具半径的一半，主轴转速应该足够低，从而能最大限度的利用机床的减震功能避免振动的产生。然而计算相应的速度并不是一项简单的工作，它需要依据不同的材料而定。遵循以上这些板肋结构的加工准则，会减少振动的发生，保证工件的表面质量。

此外，其他工艺参数的影响直接或间接的精度和表面质量加工的薄功能。这些包括步进运动、切削深度、进给速度、每齿切削速度、刀具磨损，使用切削液/空气/油雾。效果这些因素对微细铣削过程中参考，在本研究中讨论。他们考虑到在开发的微机械加工薄壁零件的功能和软件计算机参数的报告参考使用。

## 四 实验过程

不幸的是，概述的一般原则使用前很难实现现有的计算机辅助设计/辅助设计。他们可以通过编程实现铣削手动操作或开发一个特殊的操作数控程序自动生成的凸轮模块。在这项研究中对这两个选项进行了探讨。

首先，工具路径，实现这些薄壁零件加工一般直接在微机械加工中心实现，科恩 HSPC 海德汉 TNC 426 控制器在铣削循环中的应用。特别是下面的内部周期被用来创建加工肋骨和腹板的数控程序。

1. 往复铣键槽。
2. 轮廓几何的铣削。其三个'分'周期：粗铣（循环 22），底面铣削（循环 23），侧面铣削（循环 24）。

表 1:

工艺参数表				
刀具: DIXI7242R 端铣刀			工件材料: 黄铜	
刀具直径: 0.200 毫米				
切削速度 (米/分钟)	主轴转速 (转)	每齿进给 (毫米)	每步深度 (毫米)	步距宽度 (毫米)
18	39000	0.007	0.005	0.07

数控程序是由内部的  $q$  参数产生, 因此, 被加工工件的最终轮廓可能由几个重叠的轮廓组成。并且加工方法的模拟是在 CAD/CAM 的环境下进行的。这次实验是在 Pro/E 环境下进行模拟的, 首先建立一个 CAD 模型, 然后自动生成包括 Expert Machinist XML 格式的加工方法模板等相关文件。本实验生成的所有 Expert Machinist 模板是在 Pro/E 中生成的, 模拟 KERN HSPC 微细加工中心的加工过程。其默认值或推荐值都是依据主要参数进行设定 (见表 1)。

这些模板被用来修正 Pro/E 中 CAM 的模型 (记为模块 1 模块 2 模块 3, 见图 2) 使其适应微细加工过程中的特殊切削环境, 并且设计了计算 Expert Machinist 模板中的主轴转速和进给率的程序, 开发了与新的加工方法具体要求相适应的刀具数据库 (记为模块 4 和模块 5, 见图 2), Dornfeld 和 Lee 提出了和最终表面粗糙度有关的预测切削力的二次多项式模型:

$$R_a = 43.6 + 439f_i + 46.3f_i^2 + 1256v_c - 990f_iv_c \quad (1)$$

这个等式描述了切削力和表面粗糙度的关系, 尤其是微铣加工中典型的高速切削。

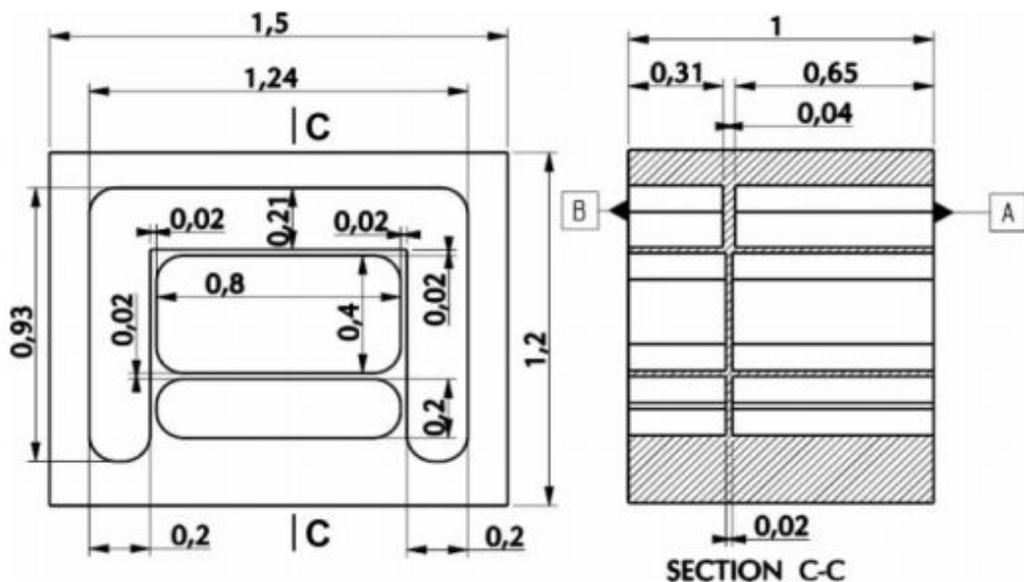


图 3 实验部件

为了验证这两种方式产生的路径，进行了一系列的实验。

## 五 实验验证

本研究采用史密斯和德沃夏克提出的测试实验，用以验证相应的微细加工方法。利用有限元的方法，在设计模型的尺寸时，将动态特性，固有频率和实际肋状结构的形状考虑在内。为了和微观尺寸相适应，模型保持了相应尺寸之间的比例。待加工工件如图 3 所示。

测试的零件的加工是在加工中心进行的。其聚合物混凝土整体床身相比于普通铸铁床身，能够更好的吸收加工时的高频振动，这对于本次测试时十分重要的。为了形成加工工件的 3D 视图，测试部分应用了表面扫描系统 MicroXAM。该系统应用相位干涉和垂直位移干涉测量，可精确到 1 纳米（标准模式）或 0.1 纳米（精确模式），符合测量的重复性原则。其校准精度优于百分之 1，侧面采样 0.11 至 8.8 微米。在加工工件的振动进行目测使用激光系统、KEYENCE。这是通过聚焦反射的激光束（50 毫米的光斑大小）从工件上的目标，一个接收器，固定在机器上。此外，在非常高的放大率，一个快速的视觉测量系统在搞放大倍数情况下研究了肋板质量

黄铜工件被用来在实验验证所提出的加工策略。工件加工的状态显示在图 4 中，为下一步加工位于中心部位的薄壁板肋结构准备。这包括以下的加工操作：

(a) 该零件的 A 部分用整体机械加工；

(b) 然后，U 型通道和 B 面的 800 \* 200 平方毫米的口袋加工其全部的深度为 310 毫米，采用往复切入加工。

工件的加工是从位于中心的 800x400  $\mu\text{m}^2$  的袋状结构开始的。在铣削过程中形成了深槽周围的肋状结构和最大的底面板状结构。本实验用了三种不同的加工方法加工该结构。

1. 在第一次试验中，铣削是用标准循环加工的，而且在加工槽和袋状结构时应用了 Heidenhain 210 和 211 慢加速循环。切削时使用 200 $\mu\text{m}$  直径立铣刀，主轴转速为 39000r/min，进给率 70 mm/min。加工结果如图 5 所示。从图中可以清楚的了解到，这种加工方法下，肋状结构产生了扭曲且厚度不一，有些部位甚至出现破损。这次测试的结果将作为评估新加工方法优劣的参考标准。

2. 在第二次测试中，采用相同的 200mm 直径的立铣刀。同样，主轴转速为 39000r/min 和进料速度 70mm/min。最初，一个槽，200 \* 800mm，被研磨到最终深度（图 6）采用往复运动的切入循环。

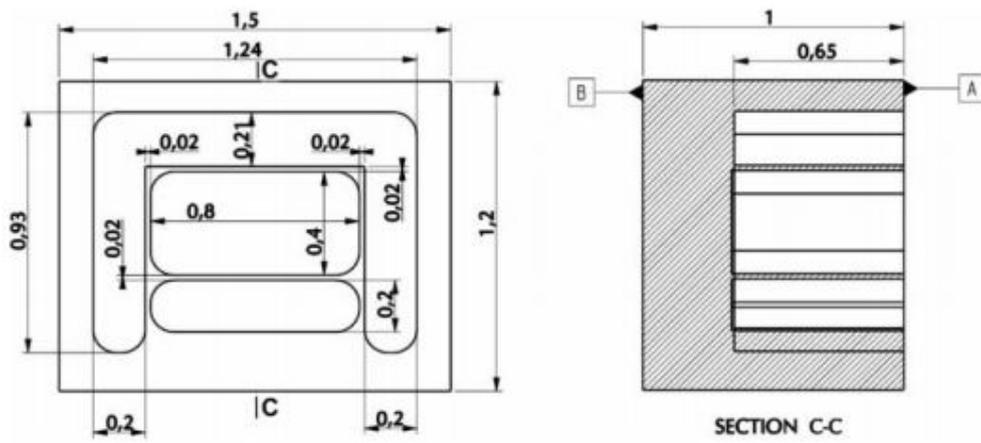
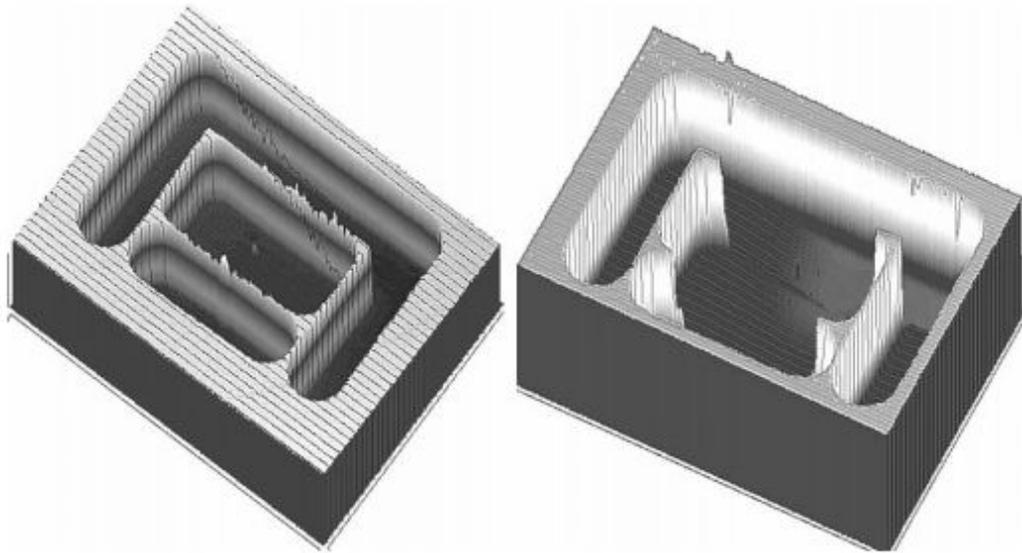
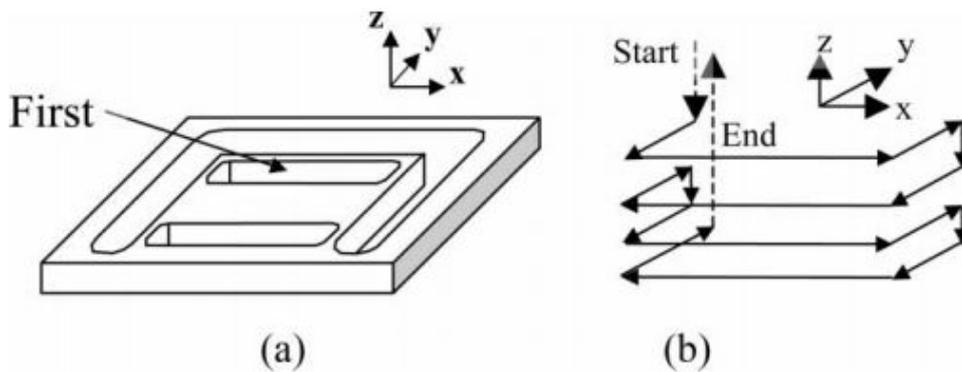


图 4 试件侧面的初加工



**Fig. 5** Side B of two test parts scanned with the surface mapping system

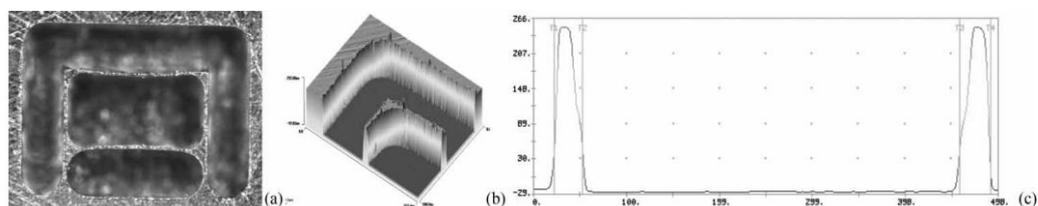
图 5 实验件的表面测图系统



**Fig. 6** Micromachining strategies

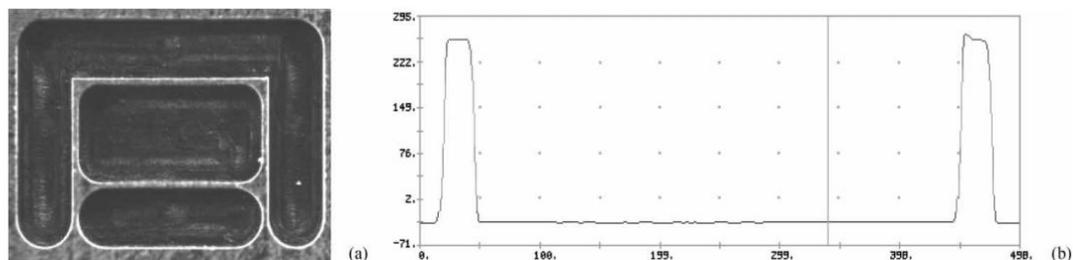
图 6 微机械加工策略

图 4 (b) 所示的刀具路径，然后用以除去剩余的材料层。先前已加工的槽中经过一个。在这种方式中，它是有可能的，以消除几乎所有的轴向力在铣削和在垂直壁上的尖。尽管在加工时有这种振动发生，持续减小零件的刚度。由于这些振动，肋骨没有一致的厚度，如图 7 所示。然而，应该指出的是，部分变形比标准分周期的使用导致小得多。很明显，这种加工策略是更适合于铣削薄壁零件。



**Fig. 7** Deformations caused by vibrations: (a) a quick vision picture; (b) a rib scanned with the surface mapping system; (c) the C-C cross-section of the ribs produced with the same system

图 7、由振动引起的变形：(a) 一个快速的视觉图像；(b) 与表面映射系统扫描的肋骨；(c) 在同一个系统中产生的 C-C 横截面



**Fig. 8** The resultant part after almost vibration-free milling: (a) quick vision picture; (b) the C-C cross-section of the ribs produced with the surface mapping system

图 8 几乎无振动研磨后得到的零件：(a) 快速视觉图像；(b) 与表面映射系统产生的 C-C 截面

3. 在第三个测试中, 一个 150mm 直径的端铣刀是用来在测试零件的中心的口袋里。加工策略与以前的测试相同。铣削进行主轴转速 40000 r/min, 进给速度 65mm/min。补贴了铣削肋骨和角半径 25 毫米 200 毫米直径的铣刀在后续操作中使用的网间的鱼片。此操作的主轴转速和进给速度分别为 39000r/min 和 70mm/min, 分别。为了避免网页偏转, 非常小的步深度 (7mm) 被用于所有的测试。监测系统的读数表明, 几乎可以忽略不计的振动, 在这两个铣削操作。机械加工试验零件的质量反映了这一。如图 8 所示, 肋骨是直的, 没有任何弯曲, 也有 c-c 横截面表明, 肋的厚度的变化是远小于在以前的测试。因此, 可以得出结论, 在最后的测试中应用的加工策略是最合适的铣削薄的功能。

## 六 结果与结论

本文研究了所加工的微型工件包含薄壁结构时, 影响微铣加工可靠性的主要因素。在制定加工方案时必须遵循一般的加工原则和相应的方针, 出于对这些原则的考虑, 新的加工方案的制定旨在减小已知的负面因素对加工的影响, 以及解决传统微细加工方法在加工板肋结构时产生的问题。薄壁件加工方案的制定须遵循以下几个主要原则:

1. 刀具路径的选择时, 加工的板肋结构需要有特制的装置或者未加工的部分进行支撑。而且加工需从工件支撑最薄弱的地方向支撑最优的地方进行切削。

2. 对于薄板结构的加工, 需要尽量减少薄壁所承受的分力, 即尽量使用无圆角的刀具进行加工。

3. 由于板肋结构之间需要有圆角过渡, 在加工时需要逐层切削去除余量, 然后使用相应圆角的刀具去除逐层切削时形成的小凸台, 从而形成圆角过渡。在加工这些小凸台时主轴转速应尽量放慢从而避免振动的产生。

为了实现和验证所提出的铣削加工方法, 首先进行了薄壁板肋结构工件的手工编程, 然后自动生成了一个特殊的 CAM 模型。

## 七 参考文献

1 **Tlusty,J.** Dynamics of high speed milling. Handbook of high-speed machining technology (Ed.R.I.King) ,1985,pp.48 - 153(Chapman and Hall,New York).

2 **Cirak,F.,Ortiz,M.,and Schroeder,P.** Subdivision surfaces :a new paradigm for thin-shell finite-element analysis. Int.J.Numer.Methods Eng.,2000,47(12),2039 - 2072.

3 **Tlusty,J.,Smith,S.,and Winfough,W.** Techniques for the use of long slender end mills in high-speed milling.Ann.CIRP,1996,45(1),393 - 396.

4 **Rao,D.** Methodologies to increase the metal removal rate and to improve the surface finish of flexible aircraft structures using high speed milling. Master's Thesis,University of Florida,1995.

5 **Fairman,R.** Strategies for the high speed machining of flexible thin-floored

- aluminium aircraft components. Master's Thesis, University of Florida, 1995.
- 6 **Kline, W. , DeVor, R.** and **Shareef, I.** The prediction of surface accuracy in end milling. ASME J.Engin.ind.,1982,104,272 - 278.
  - 7 **Altintas, Y., Montgomery, D.,**and **Budak, F.** Dynamic peripheral milling of flexible structures. ASME J.Eng.Ind.,1992,114,137 - 145.
  - 8 **Bao, W.Y.**and **Tansel, I.N.** Modeling micro-end- milling operations. Part I: analytical cutting force model. Int.J.Mach.Tools Manuf.,2000,40,2155 - 2173.
  - 9 **Tlusty, J.**and **Macneil, P.** Dynamics of cutting forces in end milling. Ann.CIRP,1975,24(1),21 - 25.
  - 10 **Wang, W., Kweon, S.H.,**and **Yang, S.H.** A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool. J.Mater.Process.Technol., 2005,162 - 163,702 - 708.
  - 11 **Jemlelniak, K.** Modelling of dynamic cutting coefficients in three-dimensional cutting. Int.J.Mach. ToolsManuf. ,1992,32(4),509 - 519.
  - 12 **Toh, C.K.** Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel. Prec.Eng.,2004,28,386 - 398.
  - 13 **Tlusty, J.**and **Ismail, F.** Special aspects of chatter in milling. Trans.ASME, J.Eng.Ind.,1983,105,24 - 32.
  - 14 **Mecomber, J.S., Hurd, D.,**and **Limbach, P.A.** Enhanced machining of micron-scale features in microchip molding masters by CNC milling. Int.J.Mach.Tools Manuf.,2005,45,1542 - 1550.
  - 15 **Lee, K.**and **Dornfeld, D.A.** Micro-burr formation and minimization through process control. Prec.Eng.,2005,29(2),246 - 252.
  - 16 **Tansel, I.N., Bao, W.Y., Tansel, B., Shisler, B., Smith, D.,**and **Murray, J.** Identification of cutting conditions by using an analytical model and genetic algorithms for micro-end-milling operations , smart engineering system design: Neural networks. fuzzy logic, rough sets and evolutionary programming. In Proceedings of conference on Intelligent engineering systems through artificial neural networks,1998,vol.8,pp.779 - 784(ASME Press, New York).
  - 17 **Dimov, S., Pham, D.T., Ivanov, A., Popov, K.,**and **Fansen, K.** Micromilling strategies: optimization issues, Proc. Instn Mech.Engrs, Part B: J.Engineering Manufacture, 2004,218,731 - 736.
  - 18 **Pro/Engineer Wild Fire v2.0**, PTC, available from [www.ptc.com/support/support.htm](http://www.ptc.com/support/support.htm), 2004.

- 19 **Lee,K.A** Study of Surface Roughness in Micro-end-milling of Aluminum,Research sponsored by CODEF and ACLARA.
- 20 **Smith,S.**and **Dvorak,D.**Tool path strategies for high-speed milling aluminium workpieces with thin webs.Mechatronics,1998,8,291 - 300.
- 21 Heidenhain TNC426,user's manual conversational programming, Section 8.4 Cycles for milling pockets, studs and slots,2002,pp.240 - 244.