

文章编号:1007-1180(2011)05-0006-06

非规则曲面多点数字化成形技术的发展

龚学鹏, 彭忠琦

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 介绍了多点成形技术的基本原理, 叙述了多点成形技术在日本、美国和韩国的研究进展。日本学者在 1959-1980 年期间研制出了多款多点成形实验装置, 但没有完全解决三维曲面的成形问题; 美国学者在 1999 年开发出了多点拉弯成形装置; 韩国学者在 20 世纪 90 年代开发出了多点弹性成形实验装置。阐述了多点成形技术在国内的研究进展, 包括成形理论的研究、成形设备的研制和成形工艺的研究。指出了多点成形技术的未来发展趋势, 即大型化、精密化和连续化是其重要的发展方向。

关键词: 多点成形; 数字化成形; 成形设备; 发展趋势

中图分类号: TG306 文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112805.0006

Development of Multi-point Digital Forming Technology for Freeform Surface

GONG Xue-peng, PENG Zhong-qi

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Basic principle of multi-point forming technology was introduced. Research situation of multi-point forming in Japan, USA and South Korea was described. Researchers in Japan developed several multi-point forming experimental equipments in 1959-1980, but 3-D surface forming question was not solved. Researchers in USA developed multi-point stretching equipment in 1999. Researchers in South Korea developed multi-point elastic forming equipment in 1990s. Research situation which including forming theory, forming equipment and forming process was described. Development trend of multi-point forming was pointed out, large-scale forming, precision forming and continuous forming being the important development direction.

Keywords: multi-point forming; digital forming; forming equipment; development trend

1 引言

在航空航天、船舶舰艇、车辆及建筑雕塑等许多军用与民用制造领域，都需要使用大量的各种材质的三维曲面和非规则曲面零件。传统的三维曲面加工方法主要采用模具成形，通常一个零件就需要数套或数十套模具，加工成本高，生产周期长，而且针对单件或个性化产品，模具成形的高额费用一般是难以承受的。传统三维曲面板类件的加工方法已经远远不能满足现代化制造技术的要求，迫切需要结合自动控制和计算机技术的数字化成形方法的出现。

多点成形是一种集自动化和柔性化为一体的先进数字化制造技术，其显著的特点就是可以实现无模成形，即通过它自身的可调基本体冲头来代替模具实现各种形状、规格和材质的规则曲面或非规则曲面的成形。本文将对多点成形的研究进展做出综合阐述。

2 多点数字化成形原理

多点成形的基本思想是将传统的整体模具离散化，由一系列规则排列、高度可调的基本体组成“柔性多点模具”来代替整体模具，通过“柔性多点模具”来实现板材的成形^[1]，如图1所示。各基本体的行程可通过计算机独立调节，改变各基本体的位置即改变了成形曲面，相当于重新构造了成形模具，这就是多点成形的柔性所在^[2]。这种方法的优点主要体现在：无需另配模具，采用高度可调的基本体即可实现不同形状曲面的成形；可以优化成形路径，在成形过程中可以随时调整基本体的位置，从而获得合理路径；可以分段成形，从而实现小型设备加工大型零件。

多点成形的方法可以分为多点模具成形、多点压机成形、半多点模具成形以及半多点压机成形。多点成形的设备则是以计算机辅助设计、辅助制造、辅助测试（CAD/CAM/CAT）技术为主要手段的板材

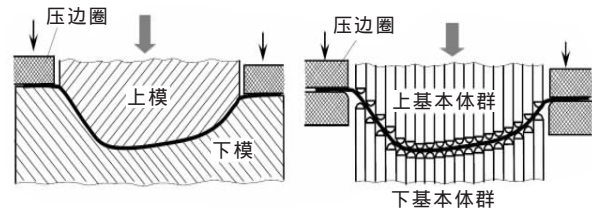


图1 多点成形原理

柔性加工新装备，它以可控的基本体群为核心，板类件的设计、规划、成形、测试都由计算机辅助完成，从而可以快速经济地实现三维曲面自动成形。

3 国外研究进展

多点成形的概念最早是在20世纪60年代由日本人提出的。当时正是战后资本主义经济蓬勃发展时期，各国之间的贸易量迅速增加，对船只的要求也与日俱增；同时，日本造船业的发展也极为迅速，但传统的船体曲面加工方法限制了生产率的提高。由于生产批量小及大型船体外板模具成形比较困难等限制，不能像汽车制造业那样实现模具成形，因而出现了一些板材柔性加工手段。1959年，日本东京大学的中岛尚正等学者制作了简单的成形实验装置——钢丝捆工具，这是对多点成形最早的尝试^[3]。在随后的30年中，日本石川岛播磨重工业株式会社、日本造船协会、三菱重工业株式会社、东京工业大学、东京大学等先后投入了大量的人力、财力，在多点压力机及成形实验方面进行了大量的研究工作。其中具有代表性的是1973年作为日本造船协会的共同研究项目，西冈富仁雄等人试制的万能式压力机^[4]，以及1976年日本三菱重工业株式会社的熊本盛秀等人研制的三排冲头的三列式压力机^[5]。图2是西冈富仁雄等人研制的万能式压力机，这种压力机没有解决好曲面的光滑度和回弹问题，因此，没有实现实用化。图3是熊本等人研制的三列式压力机，该压力机只适用于二维曲面的加工，并不能用于复杂的三维曲面以及非规则曲面的成形，因此，也没有彻底解决三维曲面的柔性成形问题。

1980—1993年，美国麻省理工学院的David E. Hardt

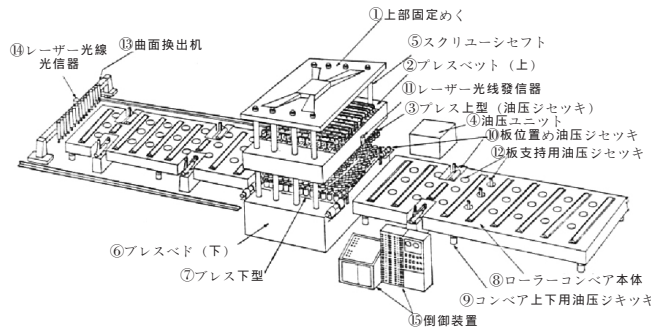


图2 万能压力机示意图

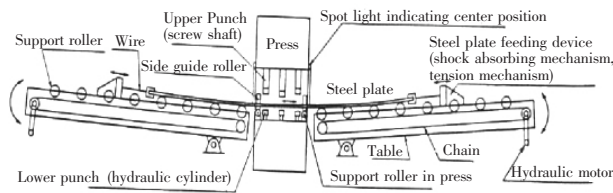


图3 三列式压力机

等对类似多点成形方法进行了长达十几年的研究，制造出了计算机控制的实验机。他们采用该实验机完成了薄板件的拉伸实验，并采用闭环控制原理来测量基本体的高度，从而控制成形精度^[6]。但他们没有对多点成形中的成形缺陷和不良现象进行细致的研究。1999年，David E. Hardt 等人投入1400万美元开发出了多点拉弯成形装置，如图4所示，用于拉弯成形形状简单的曲面件^[7]。

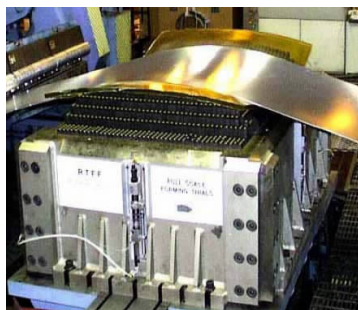


图4 MIT的多点拉弯装置

20世纪90年代，韩国科学技术研究院开始了多点成形技术的研究工作。他们研制了多点弹性成形装置，即该装置一侧采用基本体冲头，另一侧采用橡胶、泡沫塑料等弹性介质^[8]，如图5所示。但是，他们的研究还基本处于实验室阶段，只能加工二维



图5 韩国的多点成形装置

曲面件。

4 国内研究进展

国内多点成形的研究最早在吉林大学开展，1990年，李明哲教授从日本回国后便筹建了无模成形技术中心，主要从事多点成形技术的研究。到目前为止，多点成形技术已经在国内实现了商品化，并应用到了高速列车、城市建筑、潜艇和人脑颅骨修复体等领域。以多点成形技术为核心的科研成果也获得了国家科技进步二等奖。

4.1 多点成形理论的发展

多点成形技术涉及到塑性成形原理、机械设计、计算机技术以及自动控制技术等^[9]。

在塑性成形原理方面，主要采用理论、数值模拟和实验相结合的方法来进行研究。主要研究了4种基本的成形方式，即多点模具成形、多点压机成形、半多点模具成形和半多点压机成形。针对这4种成形方式，主要对板材的成形性和成形缺陷进行深入的研究。压痕、皱曲、直边和回弹是主要的成形缺陷。针对压痕，采用大半径的冲头、弹性垫和改变冲头排列的方式来进行抑制；针对皱曲，采用多点压机成形方式来改变板材的成形路径，从而获得最优的路径来抑制皱曲；针对直边，采用分段成形的方法来进行抑制；针对回弹，可采用反复成形的方法来进行抑制。

在机械设计方面，多点压力机主要采用对压式结构和C型结构，其核心机构就是基本体的调形机

构。调形机构一般分为串行和并行两种方式。串行方式效率较低,但造价低,目前,已经开发出了同时调整6个基本体的串行调形机构,可以在降低成本的前提下,大大提高调形效率。并行方式可以同时调整所有基本体的高度,具有理论上最高的调形速度,但其造价高,目前也开发出了性能良好的并行调形机构。

在计算机技术方面,主要涉及曲面造型和工艺方案确定。利用 Visual C++ 编写了 CAD/CAM 软件,该软件包括曲面造型、成形工艺设计及程序设计等有关的理论与算法。除了 CAD/CAM 软件外,还开发了多点成形专用数值模拟软件 MPFORM。该软件采用基于隐式算法 (UL) 的弹塑性大变形有限元法,可对多点成形过程进行数值分析,也兼备线性弹性、非线性弹性以及小变形弹塑性等其他分析功能。

在自动控制方面,多点成形设备的控制系统采用工业级一体化工作站作为运算和控制的核心,主要功能由基本体调形、压力机控制及辅助动作控制三部分构成,其中基本体调形为控制系统的主要功能。

4.2 多点成形装备的发展

经过十几年的发展,多点成形装备有了长足的进步,实现了商品化,应用到了工业生产的很多领域。这里主要介绍典型的3种装备,即对压式多点压力机、拉形用多点调形装置以及连续多点成形装置。

(1) 对压式多点压力机。这里主要以 YAM10-200 为例,如图 6 所示。这种压力机有上下两个基本体群,每个基本体群都可以实现调形的功能;整个压力机采用三梁四柱式结构,一次成形尺寸为 800 mm×600 mm,基本体群采用 6×12 的布置方式,基本体的调整高度为 200 mm,额定成形力为 2 000 kN。该设备采用两套机械手通过串行控制方式进行调形,平均调形时间为 8 min^[10]。采用分段成形方式时,在长度方向对成形件没有限制,只要成形后的工件不与机架干涉,就可以成形无限长的工件。除了

YAM10-200 型号外,还要再介绍一下 630KN 薄板用多点成形压力机^[11]。该设备也是对压式的压力机,其最大特点是基本体横截面小,并具有柔性压边装置,能够实现柔性压边,因此,可以用于薄板的曲面成形。除了适用于薄板件的设备外,还开发出了适用于厚板的设备,其中最典型的是应用于 2008 年北京奥运会主体育场——鸟巢的大型钢结构成形的多点压力机,如图 7 所示。

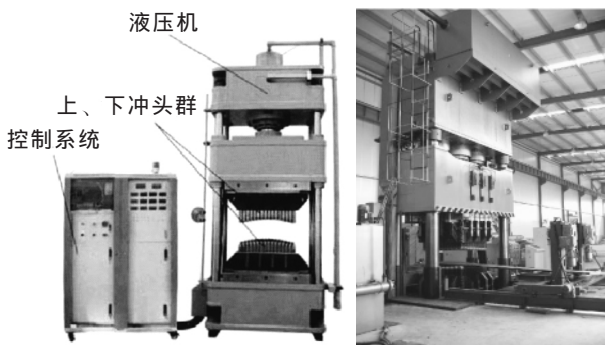


图6 对压式多点压力机 图7 鸟巢用多点压力机

(2) 拉形用多点调形装置。在飞机制造业中,大型蒙皮件的成形一直是一个难点。传统的加工方式是采用整体拉形模进行拉伸成形,这种方式制造周期长,成本高,对于不同形状的蒙皮件,则需要不同的模具。采用多点调形装置就可以实现一个多点模具加工多种不同规格的蒙皮件。SM25-1200 型多点调形装置是为飞机蒙皮件的拉伸成形而设计的,其调形尺寸为 1 200 mm×800 mm,基本体群排列方式为 48×32,基本体截面尺寸为 25 mm×25 mm,适用于 1~5 mm 厚的板材成形^[10]。该设备采用串行调形方式,一次可以调整 8 个基本体的高度,平均调形时间为 30 min,能实现不同形状蒙皮的拉伸成形。

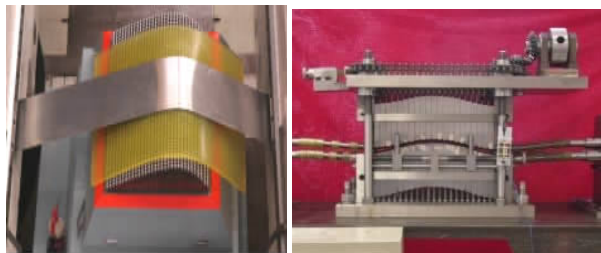


图8 拉形用多点调形装置 图9 连续多点成形装置

图8为拉形用多点调形装置。

(3) 连续多点成形装置。连续多点成形技术是近几年发展起来的,是多点成形技术与卷板成形技术的结合。这种技术采用可弯曲的辊状工具作为成形工具,并结合多点调形技术来实现三维曲面板类件的连续、高效、柔性成形。与传统的卷板成形相比,连续多点成形可以直接加工三维曲面件;与多点成形相比,其控制点数量明显减少,设备制造成本大大降低。图9为连续多点成形装置,主要由柔性辊、调形单元、下压机构、传动机构、驱动机构和机架组成,该装置的柔性辊最小曲率半径为300 mm,可加工宽300 mm以内、厚度在2 mm以下的板材。图10为加工的曲面件。



图10 非规则曲面件

4.3 多点成形工艺的发展

经过十几年的发展,多点成形实现了多种加工工艺,主要有一次成形工艺、分段成形工艺、多道成形工艺、反复成形工艺和闭环成形工艺^[2]。

(1) 一次成形工艺。这种工艺与传统的冲压成形类似,根据零件的几何形状设计出成形面,在成形前调整各基本体的位置,按调整后基本体群成形面一次完成零件成形。对于中厚板,成形变形量不太剧烈的曲面零件时,可直接进行多点成形,不需要压边。如果板材坯料计算准确,这种成形方法的材料利用率最高,且可省去后续的切边工序。

(2) 分段成形工艺。通过改变基本体群成形面的形状,在不分离工件的前提下,对大型工件逐段、分区域地分别成形,可以使用小设备成形大尺寸、大变形量的板件。分段成形根据具体情况,还可以

分为单向分段成形和双向分段成形。

(3) 多道成形工艺。多道成形的实质是将一个较大的目标变形量分成多步,逐渐实现,用一步步的小变形,最终累积成所需的大变形。多道成形是一种变路径成形方式,不仅可以提高板材的成形能力,实现大变形量零件成形;而且通过对成形路径的优化,能够实现大变形量的板材成形。

(4) 反复成形工艺。反复成形可以消除回弹,反复成形时,首先使变形超过目标,然后再反向变形并越过目标形,再正向变形…如此以目标形状为中心反复成形,随着反复成形中前后两次成形之间相对变形量的减小,回弹量也越来越小,最终形收敛于目标形状。

(5) 闭环成形工艺。利用多点成形的柔性特点,结合现代测量技术与数据处理技术,可以实现闭环成形,从而实现高层次的数字化与智能化制造。即对成形后的工件进行曲面测量,经过数据处理后,与目标形状进行比较,计算出误差,并将修整量反馈到CAD系统,重新计算并调整多点成形面进行再次成形。这一过程重复若干次,即可获得精确的工件。

5 多点数字化成形的未来发展方向

随着航空、航天、高速铁路、化工等行业的发展,对三维曲面板件的需求也在不断地增加,传统的板材成形方法已不能适应这种发展的要求,三维板件的生产需要更加先进的制造技术。目前,多点成形的未来发展方向主要集中在3个方面,即大型化、精密化和连续化^[1]。大型化:多点成形是一种板材柔性加工技术,适合于三维曲面板类件的小批量和多样化生产,所加工板类件的尺寸越大,其优越性越突出。精密化:自从对多点成形提出只能成形中厚板的质疑开始,对多点成形加工薄板的研究就从未间断过,现在已经能加工0.5 mm甚至0.3 mm厚的人脸曲面。连续化:为降低成本以及提高成形效率,将多点调形技术与连续局部成形技术结合起来,从而形成高效、连续、柔性的成形方法。

6 结 论

介绍了多点成形技术的基本思想。阐述了多点成形技术在国外的发展情况,其起源于日本,日本学者在20世纪六七十年代对这项技术进行了较为深入的研究,并开发出了多台成形装置;美国学者于20世纪八九十年代期间较为系统地研究了多点成形技术,并开发出了用于板材拉伸成形的多点成形装

置;韩国学者在20世纪90年代初开始研究多点成形技术,并开发出了多点弹性成形装置。阐述了多点成形技术在国内的发展情况,该技术经过十几年的发展,在成形理论的研究、成形设备的研制和成形工艺的研究方面都取得了突破性的进展,并成功地应用到了航空航天、高速列车、化工、城市建筑等领域。指出了多点成形的未来发展方向,即大型化、精密化和连续化。

参考文献

- [1] 野本敏治. 多点プレス法にとり船体外板の曲げ加工に関する基礎的研究 [J]. 日本造船学会论文集第170号, 1991: 587-598.
- [2] 蔡中义, 李明哲, 严庆光. 金属板材多点柔性成形理论与应用[J]. 应用科学报, 2002, 20(2): 202-206.
- [3] 中岛尚正. 针金束を用いた金型。电极の研究[J]. 日本机械学会志, 1969, 72(603): 32-40.
- [4] 西冈富仁雄. ユニバサル多点プレス法による船体外板曲げ作業の自動化に関する研究(第一報 基礎の研究)[J]. 日本造船学会论文集, 1972(132): 481-501.
- [5] 世古成道, 熊本盛秀. 三条プレスの开发[J]. 三菱重工技报, 1976, 13(6): 64-72.
- [6] Hardt D E, Chen B. Control of a sequential brakeforming process[J]. *Control Manuf.: Process Rob. Syst.*, 1983: 246-253.
- [7] Walczyk D F, Hardt D E. Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming[J]. *Journal of Manufacturing System*, 1998, 17(6): 436-454.
- [8] Cho K K. Manufacturing technology in Korea[J]. *Journal of Manufacturing System*, 1993, 12(3): 217-222.
- [9] 李东平, 隋振, 蔡中义, 等. 板材多点成形技术研究综述[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(2): 46-48.
- [10] 张庆芳, 李明哲, 蔡中义, 等. 多点数字化成形技术的发展及应用[J]. 航空制造技术, 2010(7): 43-44.
- [11] 李明哲, 崔相吉, 邓玉山, 等. 多点成形技术的现状与发展趋势[J]. 锻压装备与制造技术, 2007(5): 15-18.
- [12] 谭富星. 带孔网板多点成形过程数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2009.

作者简介: 龚学鹏 (1982-), 男, 满族, 内蒙古赤峰人, 博士, 助理研究员, 2010年于吉林大学获得博士学位, 主要从事精密机械设计研究。E-mail: gongxuepeng120@yahoo.com.cn