



国际机械工程先进技术译丛

五轴数控铣床 切削加工 先进数值优化方法

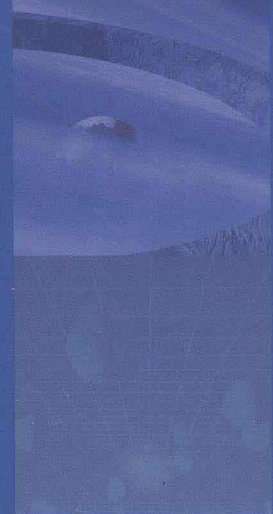
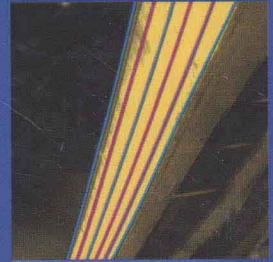
Advanced Numerical Methods
to Optimize Cutting Operations
of Five Axis Milling Machines

(俄) Stanislav S. Makhanov
(泰) Weerachai Anotaipaiboon

著

曹岩 杨丽娜 杨艳丽

等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际机械工程先进技术译丛

**Advanced Numerical Methods to
Optimize Cutting Operations of Five
Axis Milling Machines**

**五轴数控铣床
切削加工先进数值
优化方法**

(俄) Stanislav S. Makhanov

(泰) Weerachai Anotaipaiboon

曹 岩 杨丽娜 杨艳丽

白 瑀 杜 江 姚 慧

著

译

机械工业出版社

全书分为两部分：第一部分包括前3章，介绍五轴数控加工的基础知识，包括G代码编程、微分几何、刀具路径规划等；第二部分包括后4章，介绍五轴数控加工高级数值方法，包括网格生成、空间填充曲线、最短路径优化等。

本书可供高年级机械工程专业学生和研究生作为教材使用，也可供科研院所和企业的研究人员、工程人员以及加工技术人员参考，尤其对进行数控加工方面研究和应用的科研、技术人员具有参考价值。

Translation from the English language edition:

Advanced Numerical Methods to Optimize Cutting Operations of Five Axis Milling Machines

By Stanislav S. Makhanov and Weerachai Anotaipaiboon

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Springer is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

著作权登记号：图字：01-2010-7528

图书在版编目 (CIP) 数据

五轴数控铣床切削加工先进数值优化方法/ (俄罗斯) 马哈诺夫 (Makhanov, S. S.), (泰) 安诺泰派布 (Anotaipaiboon, W.) 著; 曹岩等译. —北京: 机械工业出版社, 2012. 11

(国际机械工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-39928-5

I. ①五… II. ①马…②安…③曹… III. ①数控机床-铣床-金属切削-加工工艺 IV. ①TG547

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 234532 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李万宇 责任编辑: 李万宇

版式设计: 霍永明 责任校对: 常天培

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13.25 印张 · 2 插页 · 174 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-39928-5

定价: 49.00 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑(010)88379732

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010)88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

柔性制造系统、集成制造系统、先进制造系统等的发展，逐步推动加工编程技术从基于曲线、曲面的交互式编程发展到基于加工特征的自动编程，再到基于知识的智能加工，大幅度提高了加工算法的质量和效率。数控（NC）加工编程技术的发展经历了多个阶段。目前，交互式图形编程是数控编程的主要模式，主要包括五个部分：交互工艺参数输入、刀具轨迹生成、刀具轨迹编辑、加工动态仿真和后置处理，而其中的刀具轨迹生成中的加工编程算法是计算机辅助制造（CAM）系统的核心，是其编程能力强弱的重要衡量指标。根据所适用的加工机床的不同，算法分为三坐标加工算法和多坐标（四、五坐标）加工算法。三坐标算法中的刀具轴线是固定的，近年来大量文章对其进行了深入研究，形成了参数线加工、等高线加工、投影线加工、曲面交线加工等成熟算法，并以加工模板的形式出现在商品化 CAM 软件中，在生产实践中取得了良好效果。本书作者基于丰富的 NC 加工经验，从实际应用的角度出发，利用典型实例，综合采用各种先进制造技术和方法，论述五轴铣床 NC 加工优化的关键技术和问题。

本书集实用性和先进性于一体，重点突出，实用性强，国内目前尚未发现同类型和同水平的图书，是当前提高多轴 NC 切削加工技术和水平急需的科技图书。

本书综合应用数值方法、微分几何、解析几何、实体建模、优化方法、机械工程、NC 编程等技术和方法，解决五轴铣床的 NC 加工刀具路径生成和优化问题。本书论述的方法不但能够解决五轴 NC 加工问题，也可以用于解决三轴和四轴的 NC 加工问题。本书在综述现代刀具路径优化方法的基础上可分为两部分：第一部分包括前 3 章，介

绍五轴数控加工的基础知识，包括 G 代码编程、微分几何、刀具路径规划等；第二部分包括后 4 章，介绍五轴 NC 加工高级数值方法，包括网格生成、空间填充曲线、最短路径优化等。

本书可供高年级机械工程专业学生和研究生作为教材使用，也可供科研院所和企业的研究人员、工程人员以及加工技术人员参考，尤其对进行数控加工方面研究和应用的科研、技术人员具有参考价值。

全书译文由西安工业大学曹岩统筹审稿，参加翻译的教师有曹岩、杨丽娜、杨艳丽、白瑀、杜江、姚慧。协助本书翻译和资料整理的研究生有雷蕾、闵慧、李常业、芦赟等。

本书得到西安工业大学专著基金的资助，译者在此表示衷心的感谢。由于时间及译者水平所限，错误之处在所难免，希望读者不吝指教。

译者

2012 年 9 月

序 言

多轴铣床的刀具轨迹生成和优化对于计算数学来说是一个新的应用领域。计算数学需要数值方法、微分几何、计算几何、实体成型、优化方法、机械工程和数控编程等知识。

本书介绍了一个计算框架来为刀具轨迹优化设计的有效算法。我们将其应用于五轴加工，但这些方法也可以应用于三轴或四轴机床。

本书前3章为概论，为读者介绍五轴切削必需的基础知识，例如G代码编程、微分几何和刀具轨迹规划等基本问题。可以将这几章作为大学生或研究生的计算机辅助制造课程框架内的五轴加工简介。

在后续章节中介绍的先进数值方法包括网格生成技术、空间填充曲线技术、最短路径优化技术和每种技术的分枝技术。这一部分可以被用于大学生、研究生以及企业的研究和开发。作者在设计、编制程序及检验五轴优化算法方面拥有第一手的经验。基于此经验，我们详细介绍了数值方法并提供了所有基本计算公式。此外，通过大量实际数值实例说明并分析这些方法，使读者能够理解、重构及编写其中的任何一个。

本书也包括当前的刀具轨迹优化方法回顾（130篇文献），以及简短的关于网格生成和空间曲线的发展历史。

感谢 Erik Bohez、Mud-Ameen Munlin、Bert Lauwers 和 Than Lin 对于本书的有益的讨论和建议。

VI 五轴数控铣床切削加工先进数值优化方法

也要感谢泰国国家科技部、泰国国家电子与计算机技术中心和泰国研究基金，正是因为他们的赞助，我们才能够进行许多加工试验和测量。

Stanislav Makhanov

Weerachai Anotaipaboon

2006年12月

目 录

译者序

序言

第1章 绪论	1
1.1 本书的目的和结构	1
1.2 CAD/CAM 格式	3
1.3 简短文献概述	4
1.3.1 刀具轨迹插补	5
1.3.2 适应性几何模式	7
1.3.3 刀具姿态和避免刨削	11
参考文献	17
第2章 五轴数控加工简介	26
2.1 五轴数控加工的概念	26
2.2 数控加工程序	29
2.3 五轴机床的分类	37
2.4 五轴机床运动学	41
2.5 五轴加工实例	47
参考文献	53
第3章 刀具路径规划基本问题	55
3.1 表面表示	55
3.2 切屑宽度评估	57

3.2.1 平头刀切屑宽度计算	58
3.2.2 球头刀切屑宽度计算	62
3.3 最优刀具方向和刨削避免	64
3.4 运动误差	67
3.5 刀具轨迹生成	71
参考文献	73
第4章 空间填充曲线的刀具路径	76
4.1 空间填充曲线的发展史及其应用	76
4.2 刀具路径的最优化	78
4.3 利用适应性空间填充曲线生成刀具路径	80
4.3.1 网格构造	81
4.3.2 空间填充曲线的生成	82
4.3.3 刀具路径更正	83
4.4 实例和讨论	87
参考文献	97
第5章 自适应曲线坐标系中的刀具路径	100
5.1 概述	100
5.2 网格生成的历史	101
5.3 为刀具轨迹优化生成变分网格	104
5.3.1 初步的例子	104
5.3.2 变分方法和函数	104
5.3.3 调和函数	113
5.3.4 刀具路径优化的例子	113
5.4 调和函数对刀具路径生成的应用	120
5.5 块结构化网格的空间填充曲线的生成	128
5.6 实例与讨论	130

参考文献	146
第6章 旋转最优	152
6.1 引言	152
6.2 运动学误差和角度变化	158
6.3 优化问题	160
6.4 优化问题的例子和实际加工	164
6.5 均匀角网格	173
6.6 均匀角网格的数值和加工试验	174
参考文献	180
第7章 五轴数控加工理论的最佳设置	182
7.1 引言	182
7.2 刀具轨迹分析	185
7.2.1 不变的参数	186
7.2.2 工件设定和刀具轨迹	187
7.3 最小二乘法优化和因变量	189
7.3.1 最小二乘法优化	189
7.3.2 因变量	190
7.4 实例和讨论	192
7.4.1 数值计算方法	192
7.4.2 实例	193
参考文献	199

第 1 章 绪 论

1.1 本书的目的和结构

在保持或者提高表面质量方面，目前大量的研究都集中在方法的改进和分析上，以此来减少从设计表面的计算机建模到机械加工这一过程所需要的时间。最重要的领域之一是数控加工的刀具路径规划。其主要目标是在允许的加工误差范围内获取可以产生高效的表面铣削的刀具位置和方向的数据。

由于五轴数控机床能够处理由木材、蜡、橡胶、金属、石材、塑料等原材料组成的几何形状复杂的工件，所以它正变得受欢迎起来。此外，现在的五轴数控机床还具有材料去除率高和表面光洁度好的特点。

通常，一台数控机床对设计表面的制造包括两个阶段，即粗加工和精加工。在粗加工过程中，原材料在确保不会有过度的切除或刨除（Excessive Cutting or Gouging）的情况下被尽可能快地被去除。在精加工过程中，刀具被置于和加工表面的最大接触处，以去除剩下的多余材料并产生一个精密的表面。在精加工之后，剩余的不可避免地在加工面上产生的小皱褶（Scallops）必须通过人工表面研磨和抛光来去除。精加工和人工抛光要占总加工时间的 75%。另外，人工抛光容易产生误差和不符合要求的凹凸不平。

五轴加工比三轴加工在粗、精加工阶段的效率都高。在五轴加工中，刀具相对于工件的方向可以被两个额外的自由度控制，以此来达到更高的加工效率。基于这些优点，大量关于五轴加工的刀具路径规

划方法在本书中被提及和介绍。

第1章介绍最受欢迎的CAD/CAM数据格式并给出关于五轴加工优化的数学方法的一个简短的文献概述。这个概述的主要内容是刀具路径插补、刀具姿态的适应几何模式和方法以及避免刨削。

第2章向读者说明进行五轴加工所需要的基本知识。这一章中介绍和讨论G代码编程、简单形状的五轴加工示例和使用实体造型软件对切削过程进行验证。这一章可以用作计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)大学本科课程中关于五轴加工的简要介绍。

第3章介绍了涉及五轴加工中刀具路径优化概念所需要的理论。这一章介绍了一些基本问题,例如五轴机床的运动学、零件表面表达、切屑、刀具定位和避免刨削,以及前向误差(Forward Step Error)。同时,也讨论和分析了各种结构的五轴机床。大学生或研究生也可用这一章来对CAD/CAM作相关研究。

第4章和第5章介绍了基于适应几何模式的先进优化方案,即空间填充曲线(SFC)和适应性曲线网格。空间填充曲线刀具路径具有许多有吸引力的特点,例如局部地使用这种曲线能够使切削设备沿着最佳方向运动。此外,整个表面以一条轨迹切削,消除了刀具撤回的影响。适应性曲线网格概念的应用能够同时适应刀具轨迹上的点,这样可以产生更高效的之字形、螺旋线甚至空间填充曲线结构。空间填充曲线和适应性曲线网格的结合使得在具有复杂不规则边界、切断、凹陷、岛状的表面上允许有刀具路径。

三轴机床通常被看作三维绘图仪,然而五轴机床更像是一个大口径镗床,这就是为什么将三轴程序改为五轴程序不是一项简单的工作。特别地,旋转优化的思想似乎和三轴加工的观点完全不相关。因此,第6章介绍了对于五轴加工旋转优化的理论和实践,列出和讨论了几种基于最短路径技术的优化算法。

第7章介绍了一个理论,通过建立数值算法来减少由五轴铣床的初始安装带来的运动误差。初始安装包括和工作台及机床初始设置相

关的工件的位置和方向。已知一系列的刀具接触点和刀具方向，通过最小二乘优化法找出了最优安装参数。

1.2 CAD/CAM 格式

雕塑曲面或自由表面被广泛用于当今制造业，例如模具、铸型、航空航天和机动车零部件的生产等。这些曲面通常以复杂的几何形状和变化的曲率为特点。单个曲面通常由无数小块组成，这些小块用数学参数的形式来表现，例如 Bezier 曲面、B 样条和 NURBS。雕塑表面零部件的设计和制造是一个昂贵并且费时的过程。首先，设计曲面被转换成计算机模型（可以借助 CAD 程序）；然后，CAM 程序使用计算机模型产生指令来移动机床刀具，由此产生的一系列刀具位置和方向构成一条刀具路径来加工需要的表面。

每一个 CAD 或 CAD/CAM 软件都采用一种内部格式来表现和控制需求的部件。当几何数据从一个 CAD 系统转移到另一个 CAD 或 CAM 系统时，采用一种中性的数据转移格式。其中最受欢迎的一种是 IGES（初始图形转换规范）格式（在文献 [40] 中有 IGES 格式的发展史）。IGES 格式支持由 NURBS（非均匀有理 B 样条）或者这些表示法的派生的表达形式所定义的曲面。初学者可以借助文献 [31] 来学习 NURBS，高级读者可以使用文献 [24, 98]。还有一些免费的程序库来控制 and 操作 NURBS，例如 NURBS++ 包^[1]和 NURBS 工具箱^[2]；另外还有一些免费的 IGES 文件处理工具被收集在 NIST/IGES 网页^[3]。

STL 文件最初被所谓的分层制造技术所使用，例如快速成型技术。由于描述零部件表面的简易性，STL 文件正变得越来越受欢迎。和采用 IGES 格式对于曲面的复杂描述相反，STL 格式将曲面作为三角形集合，每一个三角形由三个角的坐标和一个法向矢量来描述。由于许多成熟的三角部分算法的存在，这一技术为 CAD/CAM 的应用搭建了一个重要的平台。此外，曲面模型通常由许多小块组成。因此，通过拼

合这些小块以及产生三角形组群，可以采用许多成熟方法来处理交叉、裁剪、阴影、隐藏表面去除和刨削保护^[36]。通过将 STL 曲面^[85,115]切成薄片来获得轮廓，并根据产生的轮廓来执行加工。当然，将 NURBS 曲面切成薄片也是可以的，但需要更复杂的技术，例如文献 [81]。轮廓最后以 SLC 格式（详例见文献 [4]）保存。

其他受欢迎的 CAD/CAM 格式包括 STEP（产品数据交换标准）、DXF（AutoDesk 绘图转换格式）等。事实上，数据格式之间的差别产生了一个庞大的专门用于传输、转换和处理 CAD/CAM 文件的软件产业，例如在文献 [5] 或 [6] 中有 CAD/CAM 格式的兼容性表格。

1.3 简短文献概述

五轴加工刀具轨迹的最优化包含许多特点和多种标准，例如精确性、刀具轨迹长度加工时间、遗留凹坑的大小等，也包括避免刨削、满足主轴限制、最大化材料去除量和减少刀具损耗。最优化还会考虑切削过程中的热特性、刀具弯曲、振动、支承、工件定位和许多其他参数。标准包括机床或机床特殊部件的构造以及夹持机构的设计。对 1997 年之前的引文感兴趣的读者可以利用 Dragomatz 和 Mann^[25]的一份相当全面的概述。介绍了一些研究论文，这些论文是关于三轴和五轴加工的刀具轨迹和刀具定位几何学。包括：

- 1) 系统。
- 2) 等参数轨迹。
- 3) 不等参数轨迹。
- 4) 平面型腔轨迹。
- 5) 雕刻曲面型腔轨迹。
- 6) 粗加工轨迹。
- 7) 刀具定位。
- 8) 偏置表面方法。

- 9) 五轴加工。
- 10) 网格模型。
- 11) 像素和点模型。
- 12) 仿真和验证。

当然，以上内容有部分重叠，在这一项中涉及的技术可能在另一项中也涉及。例如，刀具轨迹生成系统可能包括以上提到的所有技术，粗加工轨迹可以用等参或不等参方法获得等。

这里的概述注重五轴加工，也包括三轴加工，前提是它们能够被扩展为五轴加工。除此之外，这里仅限于介绍利用刀具底部边缘加工零件表面的技术，例如平面端铣和圆角铣削。未包括五轴铣削（侧面铣削）和切入式铣削等那些令人感兴趣的方法。

本文关注以下几点：

- 1) 刀具轨迹插补。
- 2) 适应性几何模式。
- 3) 调整刀具姿态和避免刨削的方法。

我们相信，以上内容是进行五轴加工数值方法有效设计的最重要部分。

1.3.1 刀具轨迹插补

在计算机数控机床中，刀具移动是由一系列参考点控制的，这些点由伺服控制系统驱动。数控控制器使用线性插补技术^[66]或圆弧插补，圆弧插补可能导致各部分连接处的速度不连续。插补也可能会引起过高的加速度、后续表面不精确以及为消除它们而花费很长的加工时间。此外，现今高速加工要求进给率达到 40m/min，同时加速度达到 2g。在如此高的速度下，刀具轨迹中的很小不连续可能在参考轨迹中产生不希望要求的高频率谐频，这可能最终导致激发机械结构和伺服控制系统的固有振动模式。

虽然数控程序不能改变控制器移动机床部件的方式，但是用来加工曲线的刀具定位点和旋转角可以被改变，以此最小化或者至少减少

这些误差。生成一系列这种点的工作称作插补。早期的插补方式通过使刀具轨迹的拐角变平滑^[17]和使用低通滤波器^[126]来处理不连续问题。然而这一问题是由于弦长和弧长之间的差别引起的,这就是为什么靠增加弦长来生成刀具位置会导致进给率不稳定。因此,如果以弧长来参数化适当的曲线,这种类型的不精确可以被消除。因此,许多当前的插补方式致力于找到一种以弧长为参数的合适的多项式插补(例如 B 样条)。

不利的是,这种参数化法不能解析地处理常规的样条曲线,因此出现了许多近似解法。例如 Wang 和 Yang^[122]使用弦长和近似弧长参数化法并借助三次和五次样条函数生成了轨迹。Zhang 和 Greenway^[133]实现了基于 B 样条插补。五轴铣床工件和机床坐标系之间的坐标变换成为插补的一部分^{[77,79][14]}。文献 [121] 中的解决方法包含额外的连续性冲击情况。

此外,机床刀具驱动的限制可能导致不能保持要求的进给率,该进给率可能导致刀具的碰撞和破损。因此,Weck 等^[125]实现了三次样条函数插补,其中进给率基于刀具驱动的物理限制,利用四阶加速度分布图获取光滑的过渡。Erkorkmaz 和 Altintas^[30]介绍了一种五次样条函数轨迹生成算法,产生连续的位置、速度和加速度分布图,通过给进给率的一阶和二阶导数施加约束来提供平稳的加速和减速。

1994 年, Farouki 和 Sakkalis^[33]引入 Pythagorean-Hodograph (PH) 曲线来解决三轴机床的进给控制问题。这一曲线为以上数控加工中提到的问题提供了一种计算简洁的解法,特别是弧长用曲线参数的多项式函数表示。文献 [32] 中,结合 PH 曲线的二维 Hermite 插补被提出并分析。文献 [34, 35] 进一步发展了这一观点。众所周知,自从用 PH 曲线的多项式函数表示它的弧长以来,它们被成功地用于插补。因此,大量和 Hermite 型边界数据相匹配的平面 PH 曲线得到了发展(见文献 [61, 88, 119])。

Muller 等^[90]介绍了一种解决五轴联动样条插补算法,这种算法用

样板等式法将 PH 插补和逆向运动学问题的分析方法结合在一起, 结果是一个基于时间的样条。该样条能以高精确性表示所给的刀具轨迹。Langeron 等^[69]提出一种考虑了五轴机床运动学的多项式 B 样条插补。在工件坐标系中, 刀具轨迹的 B 样条插补包括精度要求, 同时以一种适合在 CAM 软件和数控单元之间交换的格式描述了一种五轴刀具路径。CAM 输出直接通过 B 样条曲线表示。Lo^[80]介绍了等参数、等粗糙度、等平面加工方法(见以下部分)的样条插补器。Sir 等^[118]介绍了基于样条曲线的二次曲线插补技术并将它们和 PH 曲线相比较, 其中样条曲线由圆弧组成。

最后, 大量论文介绍了高速铣削插补器。在高速加工中, 由于机床刀具的物理限制和 CNC 控制器的程序段处理时间, 实际平均进给率可能显著低于程序控制进给率。在很多情况下, 机床刀具几乎不能达到制造者提供的最大进给率。当程序段处理时间比程序段执行时间长、当下一步移动需要的信息还未获取、但机床已经到达这个部分的终点时, 这种情况就会发生。在这种情况下, 目前的 CNC 会自动减少进给率并导致较长加工时间。这个相对新的问题在文献 [55, 64, 87, 109] 中有论述。

1.3.2 适应性几何模式

这部分概述的目的是构建适合标准的几何模式, 这个标准可以作为刀具轨迹质量的评估, 例如运动学误差、皱褶高度、底切、过切等。它也包括复杂型腔铣削方法, 因为这需要特殊的几何模式。最终, 几何模式的构建可能或者不能考虑实际机床运动学。很多情况下, 对于三轴加工使用的模式, 只需要某些修改就可以适合五轴加工。

最简单的刀具轨迹规划算法因其简洁和容易计算(见文献 [25, 108]), 而采用结构化的之字形和螺旋形运动。之字形和螺旋形运动沿着一个坐标使用统一的步长, 这个坐标将从零部件表面提取出的所需曲线参数化。早期的适应性方法取代了统一间隔, 因为它用类推插补分配刀具定位点, 这种插补具有可变步长。首先, 轨迹被假设为线性