

## 数控路径规划的新进展简介

宓振鹏 袁春明 中国科学院数学与系统科学研究院

数控 (Numerical Control) 是数字控制的简称, 是由存储在介质里面的精确的编程命令进行自动化机床控制的一种技术。现在的数控一般都是指计算机数字控制 (Computer Numerical Control)。数控技术是利用数字化信息对机械运动及加工过程进行控制的一种方法, 是制造业的核心技术之一, 对国民经济和国防安全有着重要作用和战略意义。数控系统是数控机床的“大脑”, 直接决定数控机床的性能。数控机床是一种由计算机程序控制的自动化机床。目前常用的数控机床有三轴联动数控机床和五轴联动数控机床。其中, 由于五轴联动数控机床可以加工叶轮、叶片等比较复杂的曲面, 并且具有高效率、高精度的特点, 因此在精密加工中更为常用。

五轴联动数控机床是一种专门用于加工复杂曲面的机床, 它可以使得待加工曲面具有更好的加工效率和表面质量, 对一个国家的航空、航天、军事、科研、精密器械、高精医疗设备等行业有着举足轻重的影响力。五轴联动数控机床通常由三个平移自由度 (沿 X 轴、Y 轴和 Z 轴) 与两个绕轴旋转自由度组成, 如图 1 所示。

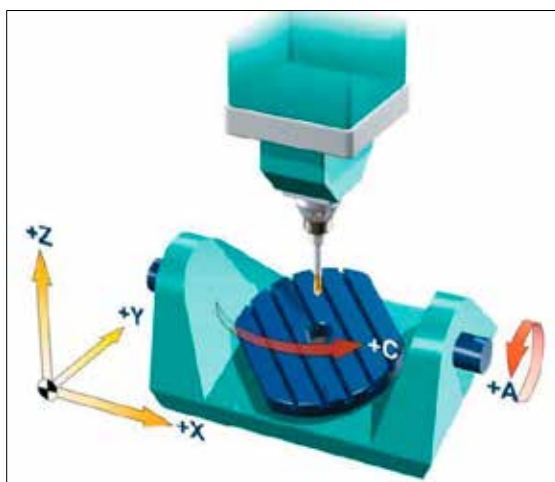


图 1 五轴联动数控机床

## 一、刀位点轨迹规划

五轴数控系统中,路径规划需要考虑两个方面的问题:刀位点的轨迹(3维)和刀具姿态(2维)。本节将主要介绍刀位点轨迹。

路径规划的常用方法主要有三种:等参数法<sup>[1]</sup>,截平面法<sup>[2]</sup>和等残高法<sup>[3]</sup>。等参数法主要应用于参数曲面 $S(u,v)$ ,规划每条路径时,固定其中一个参数,沿另一个参数的方向生成刀位点(图2(a))。但是,由于参数空间中的等参数曲线在欧氏空间中不是直线,所以相邻路径之间的路径宽度和残留高度不均匀,这会影响加工效率。另外,如果目标曲面是由多个曲面拼接而成,或是网格表示,那么等参数法会失效。截平面法则是利用一组平行平面与加工曲面的交线来规划路径(图2(b))。该方法对拼接曲面和网格曲面都适用,鲁棒性很好。但是平行平面的选择会极大地影响加工效率。对于等参数法和截平面法,虽然生成的刀具路径比较光滑,但是会出现刀路叠加的现象,也就是说,不可能处处达到最大残高限制,这样会使得刀具路径较长,从而影响加工效率。等残高法在给定第 $i$ 条路径上的刀位点 $P_{i,j}$ 后,利用预设最大残留高度,在垂直于当前切削方向的方向上,计算出下一条路径对应的刀位点 $P_{i+1,j}$ (图2(c))。由等残高法规划的路径,能够保证残高的一致性,减少路径总长度,提高了加工效率,并且该方法对任意曲面都适用。但是,等残高法的计算复杂度比较高,并且得到的加工路径并不光滑。由于局部的路径规划方法并不能体现整体的光滑性,因此如何在规划加工路径的同时考虑曲面整体的结构是一个很有意义的问题。另外,考虑刀具与工件的碰撞问题,在机器人学中被广泛应用的C空间<sup>[4]</sup>也被用来进行路径规划<sup>[5]</sup>。

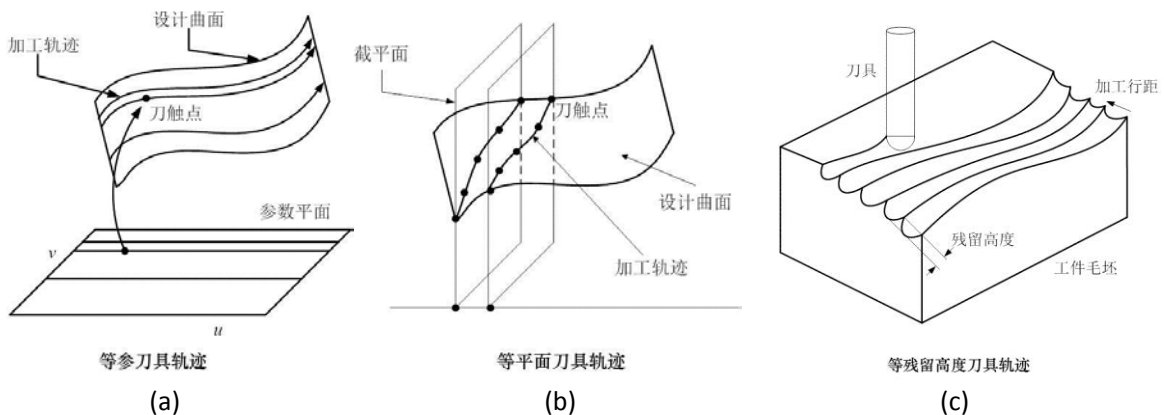


图2 三种常用路径规划方法

## 二、刀轴轨迹规划

在五轴数控加工中，除了需要进行路径规划外，还需要对刀具姿态（刀轴方向）进行规划。在进行刀轴规划时，一般需要实现两个目标：无干涉和光顺。刀具在高速加工中，可能会与工件发生碰撞（全局干涉）、局部干涉和尾部干涉（如图 3 所示）等情况（以下统称为干涉）。无论哪种干涉情况，都会对刀具和工件造成不可修复的损害，严重的还可能对机床造成损伤。所以，必须保证高速加工中的刀具与工件之间是无干涉的。另一方面，在加工曲面曲率较大的地方，可能会存在刀轴方向突变的情况（如图 4 所示），会影响加工质量。因此需要对刀轴方向进行优化，保证整体刀轴方向是光顺的，不会发生刀轴方向突变的情况。

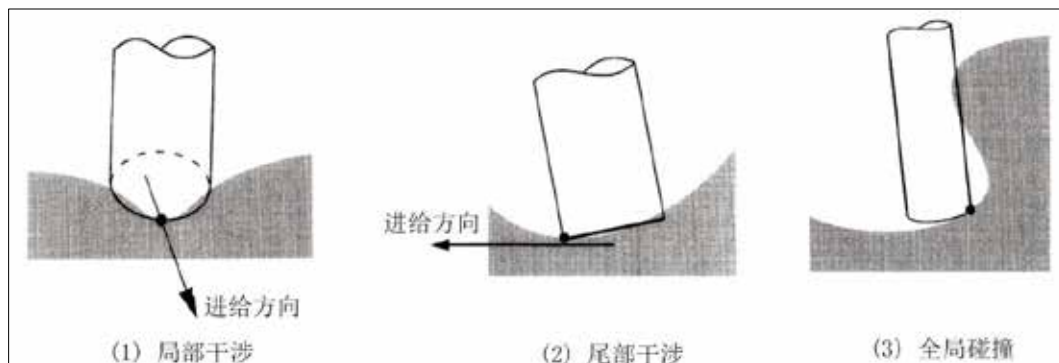


图 3 三种干涉情况<sup>[6]</sup>

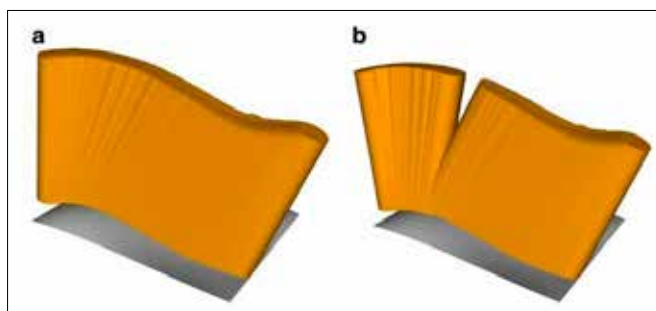


图 4 刀轴光顺与刀轴突变<sup>[7]</sup>

如图 5 所示，对于五轴数控加工，在局部坐标系中，刀轴方向完全由俯仰角  $\theta$  和倾斜角  $\phi$  确定。将

三维空间中的单位球的上半球 ( $z \geq 0$ ) 映射到由俯仰角  $\theta$  和倾斜角  $\phi$  张成的二维平面, 则二维平面中每个点都代表了空间中的一个刀轴方向。在每个刀位点处, 所有可行 (无干涉) 的刀轴方向组成的集合, 称为该点处的构型空间, 或 C 空间。在规划刀轴方向时, 一种常用的方法就是基于 C 空间的方法, 即首先计算出每个刀位点处的 C 空间, 然后在 C 空间内进行刀具姿态的规划。但是, 计算曲面上某点处的精确 C 空间, 是非常复杂和困难的。对于球头刀而言, Morishige 等人<sup>[8]</sup> 将加工工件视为多面体, 并计算了球头刀与多面体的碰撞边界, 进而计算出 2 维 C 空间 (如图 6 所示), 最后将不可行的刀轴方向移动到 C 空间的边界, 从而生成无碰撞的刀轴方向。Morishige 等人<sup>[8]</sup> 的方法可以有效避免刀具干涉问题, 但是没有考虑刀轴方向的突变情况。对于平底刀和环形刀, 也有很多相关的工作, 这里不再详细介绍。

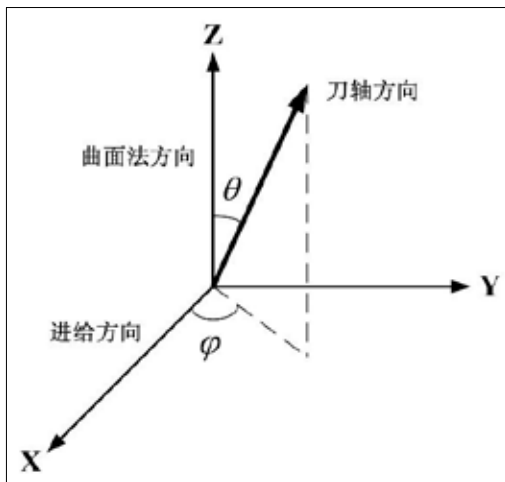


图 5 局部坐标系与刀轴方向

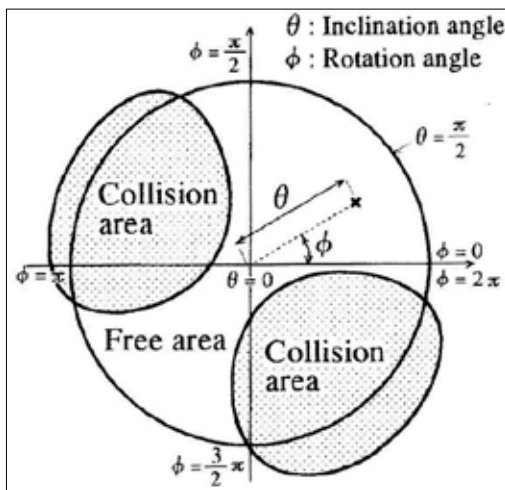


图 6 2 维 C 空间<sup>[8]</sup>

### 三、基于球头刀刀轴轨迹规划

对于五轴数控加工而言,既需要规划刀位点的轨迹,又需要规划刀轴的方向。对于球头刀来说,由于其有效切割半径处处相等,所以刀轴方向与加工带宽无关,因此路径规划与刀轴轨迹规划可以分开进行。所以,在进行球头刀的刀轴轨迹规划时,通常认为加工路径已知。

Plakhotnik 等人<sup>[7]</sup> 基于已有刀轴可行域,利用图论的方法对刀轴方向进行规划。但是,他们的方法有以下几个不足之处:

1. 没有介绍刀轴可行域的计算方法
2. 没有考虑刀位点之间的距离
3. 没有考虑刀轴方向变化率的影响,这会引起机床不必要的震动

基于以上几点,我们首先给出计算在每个刀位点的刀姿可行域(C空间)的算法。然后根据每个刀位点的刀姿可行域,我们设计了一个基于图的最短径路算法的刀姿优化方法。在该算法中,我们引入了差分图的概念,使得得到的刀姿与原有方法<sup>[7]</sup>比较具有更好的光滑度和力学性能<sup>[9]</sup>。下面我们详细介绍这一工作。

由于球头刀的刀位点轨迹和刀轴方向可以分开进行规划,所以本节中假设加工路径已知。我们的目标是生成无碰撞的光顺刀轴轨迹,数学模型为

$$\begin{cases} \min \max_i |\omega_i| \\ \min \max_i |a_i| \\ s.t. |\omega_i| \leq \Omega_{\max}, i \in \{1, \dots, N\}, \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $a_i$  为刀轴方向的伪加速度。

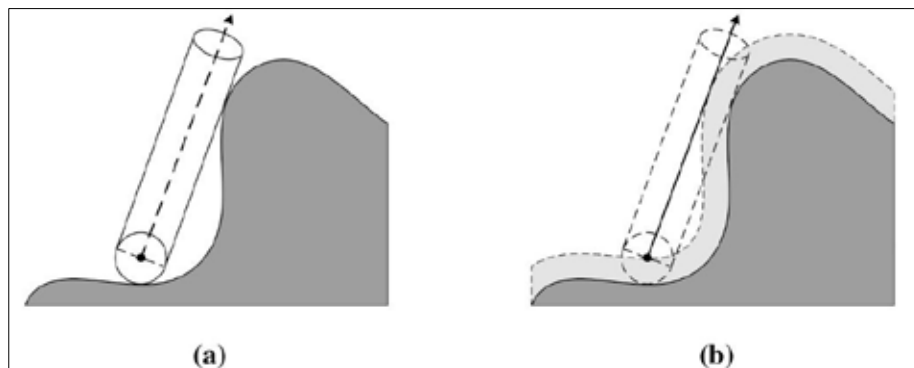


图 7 (a) 刀具与曲面碰撞检测 (b) 射线与偏置曲面碰撞检测

首先,需要计算每个刀位点处的 C 空间。将球头刀视为一条射线,并将加工曲面沿外法向量偏置球头刀半径的长度,如图 7 所示。则刀具与曲面的碰撞检测转化为射线与偏置曲面的碰撞检测。将偏置曲

面用三角网格近似后，利用球极投影计算得到 C 空间边界，如图 8 所示。

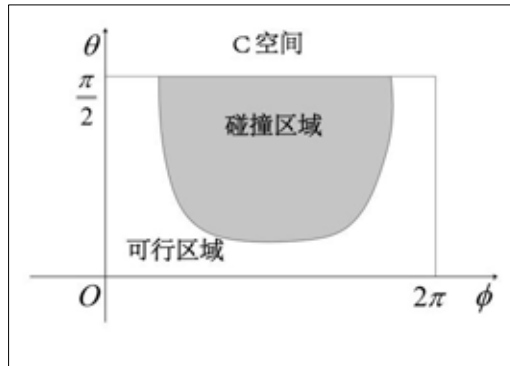


图 8 某一刀位点处的 C 空间

然后，利用刀具路径上每个刀位点的 C 空间，构建分层有向图及其差分图。简单起见，假设每个 C 空间可以离散成两个点，由这些离散点可以构造分层有向图，进而可以构造对应的差分图，如图 9 所示。

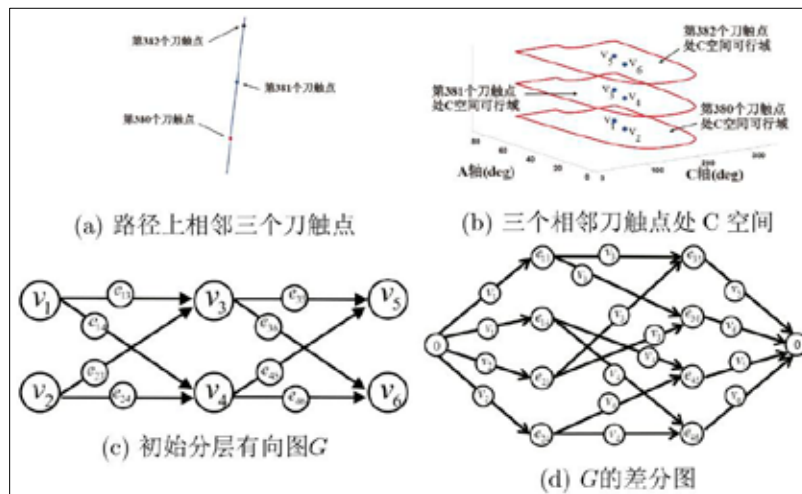


图 9 差分图示意图

最后，将模型 1 转化为单目标优化问题

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N \sqrt{\omega_i^2 + \lambda \cdot a_i^2} \\ s.t. |\omega_i| \leq \Omega_{\max}, i \in \{1, \dots, N\}, \end{cases} \quad (2)$$

并给差分图中的边赋相应的权值，利用 Dijkstra 最短路算法，得到每个刀位点处的刀轴方向。另外，我们提出了一种细分调整的迭代算法，可以解决数据量过大、超过计算机计算能力限制的问题。需要注意的

是,在差分图中,边的权值可以包含原始分层有向图中相邻三层点的信息,也就是说,边的权值可以包含刀轴方向角加速度的信息。整体算法流程如图 10 所示。

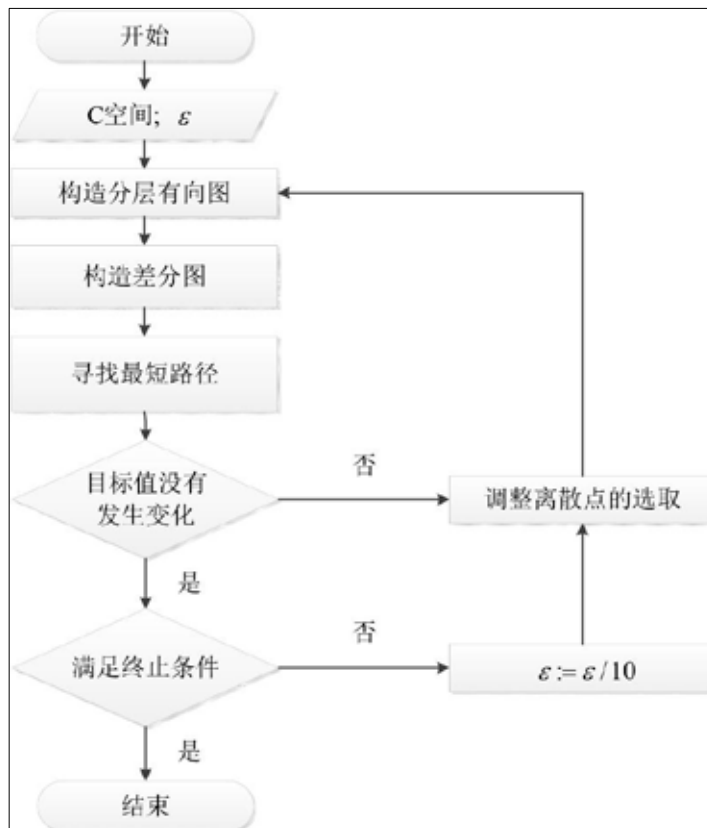


图 10 基于差分图的刀轴优化算法流程图

在给定 C 空间或者刀轴方向可行域后,本节介绍的算法可以应用于任何刀具。这样规划得到的刀轴方向,光顺性有了很好的保证,并且有效减少了刀具和机床的振动。

#### 四、展望

总的来说,五轴数控路径规划问题还是有很大的研究空间的。为达到高速高精度的加工效果,如何设计一个算法,既可以兼顾加工的效率又体现路径的光滑性和相邻路径的相似性,是五轴数控路径规划的核心问题之一。

此外,在五轴数控加工中,如何将路径规划与速度规划相结合,来设计时间样条加工路径,使得它满足机床的各项性能限制,是一个更具挑战性的问题。

## 参考文献

- [1] Loney G C, Ozsoy T M. NC machining of free form surfaces. *Computer-Aided Design*, 1987, 19(2): 85-90.
- [2] Huang Y, Oliver J H. Non-constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces. *Int J Adv Manuf Technol*, 1994, 9(5): 281-290.
- [3] Suresh K, Yang D C H. Constant scallop height machining of freeform surfaces. *Journal of Engineering for Industry. ASME Transactions*, 1994, 116(2): 253-259.
- [4] Lozano-Perez T, Wesley M A(1979) An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. *Communications of the Acm*, 1979, 22(10): 560-570.
- [5] Choi B K, Kim D H, Jerard R B. C-space approach to tool path generation for die and mould machining. *Computer-Aided Design*, 1997, 29(9): 657-669.
- [6] Jun C S, Cha K, Lee Y S. Optimizing tool orientations for 5-axis machining by configuration-space search method. *Computer-Aided Design*, 2003, 35(6): 549-566.
- [7] Plakhotnik D, Lauwers B. Graph-based optimization of five-axis machine tool movements by varying tool orientation. *Int J Adv Manuf Technol*, 2014, 74: 307-318.
- [8] Morishige K, Kase Y, Takeuchi Y. Collision-free tool path generation using 2-dimensional C-space for 5-axis control machining. *Int J Adv Manuf Technol*, 1997, 13: 393-400.
- [9] Mi Z P, Yuan C M, Ma X H, Shen L Y. Tool orientation optimization for 5-axis machining with C-space method. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017, 88(5-8): 1243-1255.