

南京工程学院

毕业设计(论文)外文资料翻译

原文题目：Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis

原文来源：International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 505–520

学生姓名：石佳倩 学号：X00231120404

所在院(系)部：工业中心

专业名称：机械设计制造及其自动化

五轴铣床运动链的设计与分析

作者：E.L.J. Bohez

摘要：现如今五轴数控加工中心已经非常普及。大部分机床的运动学分析都基于笛卡尔直角坐标系。本文罗列了现有的概念设计与实际应用，这些从理论上都基于自由度的综合。一些有用的参数都有所规定，比如工件使用系数，机床空间效率，方向空间搜索以及方向角等。每一种概念，它的优缺点都有所分析。选择的标准及机器参数设置的标准都给出来了。据于 Stewart 平台的新概念最近行业内已有介绍并作简短讨论。

关键词：五轴；机床；运动链；工作区；CNC；旋转轴

1.绪论

设计一台数控机床主要遵循以下规则：

- 1、刀具和工件在空间方向上要有足够的灵活性。
- 2、方向和位置的改变要尽可能的快。
- 3、方向和位置的改变要尽可能的准确。
- 4、刀具和工件快速变、换。
- 5、环保
- 6、切削材料速度快

一台数控机床的轴的数目通常取决于其自由度数目或者独立控制运动的导轨数目。国际标准委员会推荐通过右手笛卡儿坐标系来命名坐标轴，刀具相应的为 Z 轴。一台三轴铣床上有三条导轨，X,Y,Z 向，它们可用来在长度范围内在任意位置上移动。加工过程中刀具轴的位置始终不变。这就限制了刀具相对于工件在方向上变化的灵活性，并且导致多次工装的出现。为了尽可能的提高刀具相对于工件的灵活性，无需再次装夹工件，必须要加入多个自由度。对于传统三轴机床来说这可以通过提供旋转滑台来实现。图1给出了一个五轴铣床的例子。

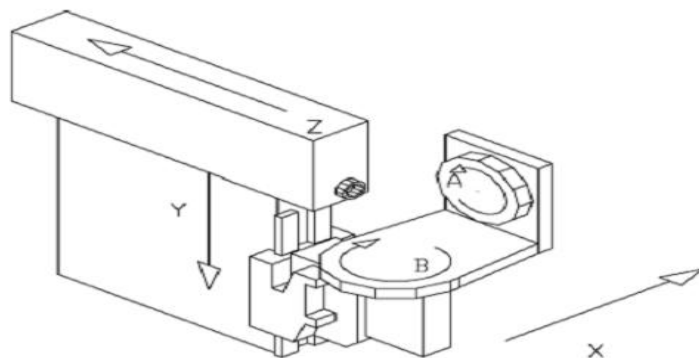


图 1 五轴数控机床

2.运动链图表

通过制作机器的运动链图表对于机器的分析来说十分有用。通过运动简图得知两组轴可以迅速的区分开：工件装夹轴和刀具轴。图 2 给出了图 1 五轴机床的运动链简图。由图上可以看出工件由四根轴承载，刀具仅在一根轴上。这个五轴机床与两工位操作机器人很相似，一个机器人夹住工件，另一个夹住刀具。为了获得刀具工件方向上的最大自由，五个自由度已是最低要求，这就意味着工件和刀具可以在任意角度位置相对定位。最低需求的轴数也可以通过刚体运动学的方法来分析。两个刚体在空间确定相对位置，每个刚体需要 6 个到 12 个自由度。然而由于任意的移动或转动并不改变相对位置就允许将自由度减少到 6。两个刚体之间的距离通过刀具轨迹来描述，并且允许去掉一个额外的自由度，结果也就是 5 个自由度。

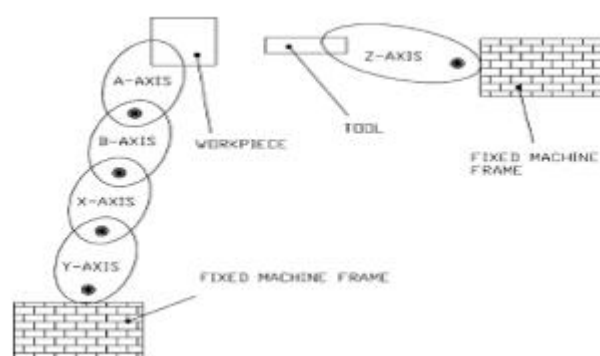


图 2 运动链图

3.参考文献

最早（1970 年）到目前并且仍就有参考价值的对五轴数控铣床的介绍之一是由 Baughman^[1]提出的并清楚的阐述了它的应用。APT 语言随后成为唯一的五轴轮廓加工的编程语言之一。后处理阶段的问题也在数控发展的早期由 Sim^[2]清楚的表述出来，并且大部分问题到现在仍然有效。Boyd^[3]也是最早引进数控机床的先驱之一。Beziers^[4]的书也是非常有用的介绍。Held^[5]在他的小型铣削加工的书里对多轴机床也有非常简短但启发性的定义。目前一篇适用于解决五轴数控机床工作空间计算的文章，通过使用 Denavit-Hartenberg 发表并由 Abdel-Malek and Othman^[6]改进的算法应用于多弧段切削。许多对机床的类型和概念设计，可以被应用于五轴机床^[7]但不是专门为五轴机床。对部分机床设置的数量和最优取向上进行了探讨^[8]。关于对刀具路径生成的技巧和新需求由 B.K. Choi et al^[9]给出。工件与刀具的图像模拟也是研究的热点并且是一个好的入门读物^[10]。

4.五轴机床运动结构的分类

从 R 轴（旋转轴）和 T 轴（移动轴）划分大致可以分为四大部分：（i）3 个移动轴和 2 个转动轴；（ii）2 个 T 轴和 3 个 R 轴；（iii）1 个移动轴和 4 个转动轴以及（iv）5 个转动轴；几乎所有五轴机床都是第一组。也有一些焊接机器人，弯折机器以及激光机器也属于这一类。只有有限距五轴机床属于第二组，用以制造船舶螺旋桨用。第三组和第四组用于制造机器人，常常另加三个自由度。在不同的制品中，五根轴可以在工件或刀具之间分配。第一分类可以由工件和刀具所承载的轴数以及每根轴在运动链中的功能来划分。另一种分法是据于旋转轴的位置，在工件一边还是在刀具一边。五自由度基于笛卡尔坐标系的机床是：3 个移动轴 X,Y,Z(通常表述为 TTT)和 2 个旋转运动 AB,AC,BC（通常称作 RR）。拥有 3 个旋转轴和 2 个移动轴的制品并不多见。如果一个轴装夹工件，习惯上不另加东西在这根轴上。由图 1 五轴机床可记为 X'Y'A'B'Z. XYAB 轴装夹工件，Z 轴装刀具。图 3 展示的是 XYZA'B'型机床，3 个移动轴装夹刀具，2 个旋转轴装工件。

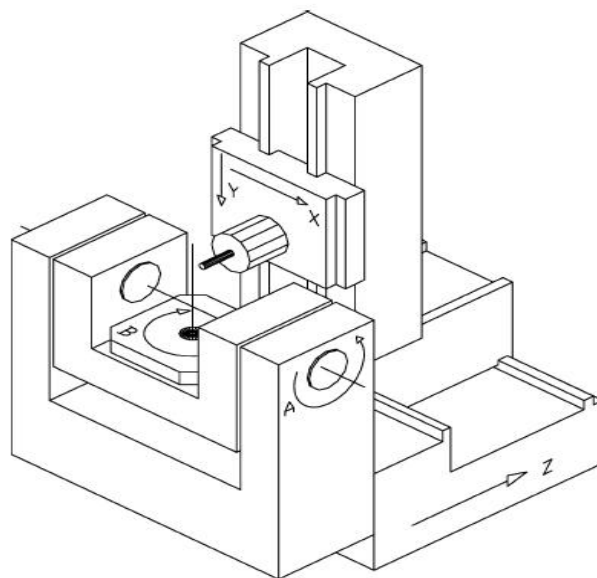


图 3 XYZA'B'型机床

4.1 基于工件和工具承载轴顺序的分类

理论上，如果工具和工件承载轴的两个运动链的顺序算作一个不同的配置，可能配置的数目是相当大的。也只有两个线性轴和三个旋转轴的组合包括在内。

一个工具承载轴和四个工件承载轴可以在一个五轴机床组合如下：对每一个可能的工具承载轴 X, Y, Z, A, B, C 其他四个工件承载轴可以从现存的五个轴中选。所以四轴组合的数量与另一个配置是考虑不同排列 $5 \times 4! = 120$ 为每个可能的工具轴选择（1 出 6 或 6 的可能性）。所以理论上 $6 \times 120 = 720$ 可能五轴机床使用一个工具承载轴。同样的分析可以用于所有其他组合。t 数量的工具承载轴和 w 数量的工件承载轴（ $w+t=5$ ）的组合的总数量如下。

$$N_{comb} = \binom{6}{t} t! \binom{6-t}{w} w! t \leq 3, t + w = 5 \quad (1)$$

$$N_{comb} = \binom{6}{w} w! \binom{6-w}{t} t! t > 3, t + w = 5 \quad (2)$$

该方程的值总是等于 6! 或 720 W + T=5 时。这些 720 的组合将只包含两个线性轴。如果只有五轴机床被认为带有三个线性轴，那么只有 $3 \times 5! = 360$ 组合是可能的。

5.五轴机床工作空间

在定义五轴机床工作空间之前，有必要说明一下刀具工作空间和工件工作空间。刀具工作空间就是通过刀具参考点沿着刀具轨迹生成轴来获得。工件空间也是同样定义的（工作台中心可以被选择为工件参考原点）。这些工作空间可以通过计算切削量来定义。

基于上述定义一些参数量可以定下来，这些参数对比较，选择以及设计不同类型机床都是十分有用的。

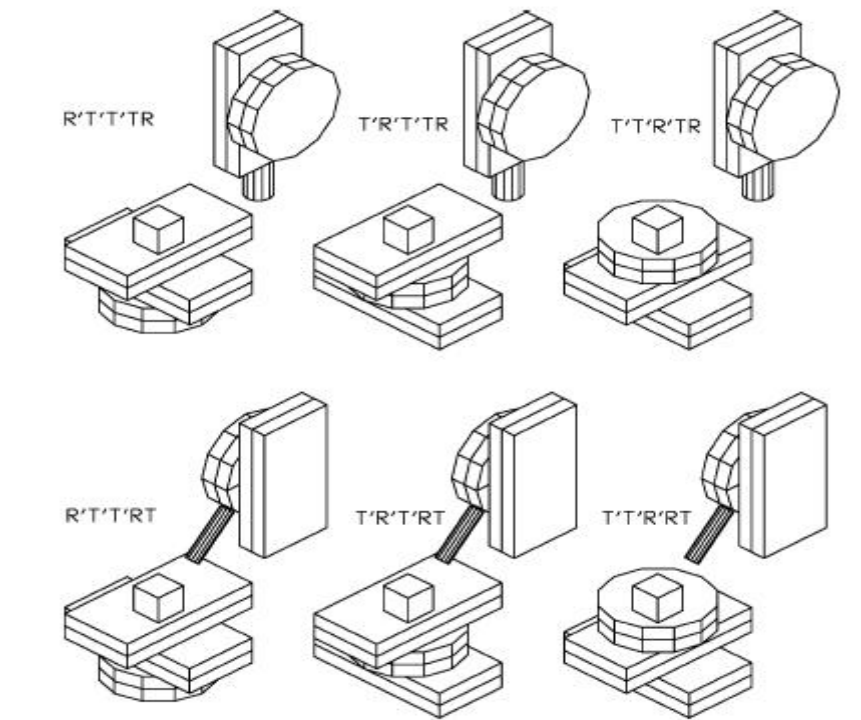


图 11 G2/G3'组中的 R'R 机床

6.选择五轴机床的标准

完全学习好如何为专用机床选择或设计一个五轴机床是不现实的。只有使用主要标准，来核实五轴机床并加以讨论。

6.1 五轴机床的应用

应用程序可以分为位置和轮廓。图 12 和图 13 展示了五轴位置机床和五轴轮廓机床。

6.1.1 图 12 展示了一个多孔以及不同角度有平台的工件。要用一个三轴磨床加工这个工件，一步也无法完成。如果用五轴机床则可以加工。轮廓更多的参数等信息可以在参考文献^[13]中去查看。五轴机床用于加工轮廓的有：（i）叶片类产品，例如空气压缩机的叶片和涡轮机的叶片；（ii）燃料泵的喷嘴；（iii）轮胎的轮廓；（iv）医学假肢，例如人工心脏瓣膜；（v）复杂表面的模具。

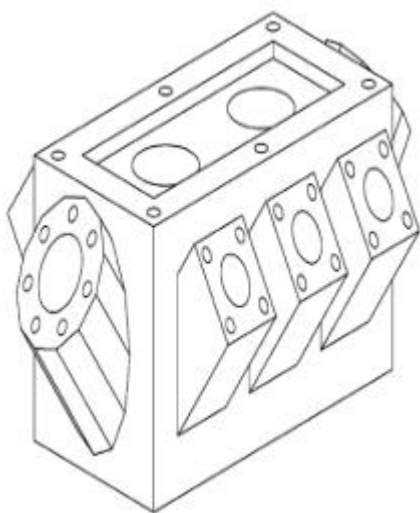


图 12 五轴加工多孔复杂方位角零件

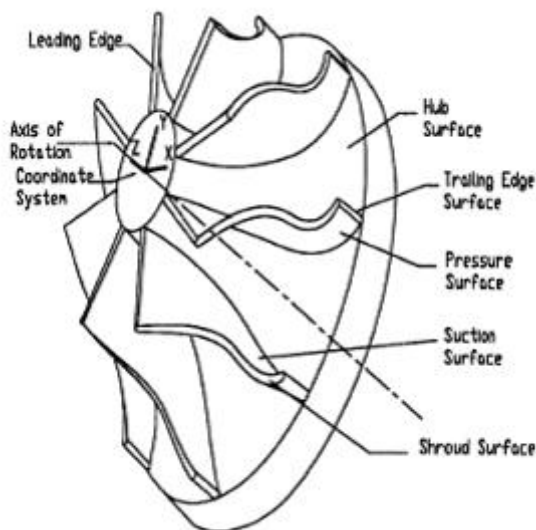


图 13 五轴加工复杂轮廓零件

6.1.2. 五轴轮廓

图 13 显示了一个五轴轮廓的例子，机器的表面形状复杂，我们需要控制工具相对部分切割过程中的方向。该工具工件每一步方向的变化。CNC 控制器需要同时控制在材料去除过程中所有的五轴。轮廓上更多详情可参考文献^[13]。五轴机床用于加工轮廓的有：（i）叶片类产品，例如空气压缩机的叶片和涡轮机的叶片；（ii）燃料泵的喷嘴；（iii）轮胎的轮廓；（iv）医学假肢，例如人工心脏瓣膜；（v）复杂表面的模具。

6.2 轴配置选择

轴配置选择的大小和重量是非常重要的部分作为第一标准来设计或选择一个配置。非常沉重的工件需要短的工件运动链。也有一个工件偏爱横机表内，使之更方便修复和处理。把非常沉重的工件放在一个旋转轴运动链上将增加方向的灵活性。提供一个单一的横向旋转轴的工件，会使机器更加灵活。在大多数情况下，工具携带的运动链将尽可能保持简短，因为刀具主轴驱动器必须同时进行。

6.3 例 1—轴加工的首饰

图 14 中一个典型的工件可以作为花形图的一部分。此应用程序是清楚轮廓。将部分组装成相对较小的工具。小直径工具也需要一个高速主轴。水平旋转表将作为经营者一个很好的选择将有一个良好的视图部分（ 360° 范围）。所有工件承载轴将是一个很好的选择，因为刀具主轴可以固定，并且非常严格。有 20 种方法，可以使轴合并起来，组合成工件运动链。这里只有两个运动链将被考虑。案例一是图 15 TTTRR 运动链图。案例二是图 16 RRTTT 运动链图。对于机器模型 I $X=300\text{mm}$ ， $Y=250\text{mm}$ 和 $Z=200\text{mm}$ ， $C=N$ 的 360° ， $A=360^\circ$ ，以及 100mm 直径机床表将被考虑。为此运动工作区的工具链是一个单点。参考点的设置也可以选择小。如果两轴中心线的相交点在旋转参考，移动工件的工作空间将得到大小 XYZ 或 $300 \times 250 \times 200$ 立方毫米。如果两个旋转轴的中心线的不相交的工件，工件参考点，有较大的工作空间。这将是一个圆边棱柱形。这个圆角半径边缘的偏心距，工件相对于每一个参考中心线。模型 II 图 15 中 RRTTT 旋转轴运动链开始时的运动。这里还有两种不同值的旋转偏心距将被考虑。第 5 条中定义的参数计算为每个模型的偏心率总结于表 1。可以看出，随着旋转轴的运动链的结束（模型 I），机床工作空间要小得多。有两个主要原因。工具和工件的波及体积要小得多，第二个原因是由于很大一部分机床的工作空间无法使用的情况，因为线性干扰轴。然而工作区利用系数较大的模型没有偏心距，因为工具的工作区与工件的工作区相比还是相对较小的模型 I 并且 $e=50\text{mm}$ 。空间索引的定位是相同的这两种情况，如果该表直径保持不变。模型 II 可以处理更大的工件在相同范围的线性转动轴运动链开始时，形成一个更大的机床工作空间，也少了很多干扰机床工作空间的幻灯片。其他 18 个可能的选择将在索引值之间。

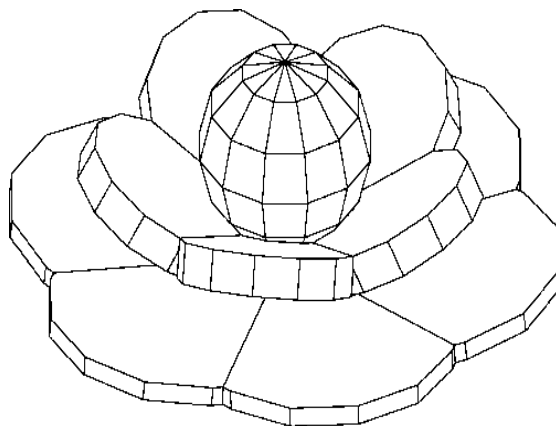
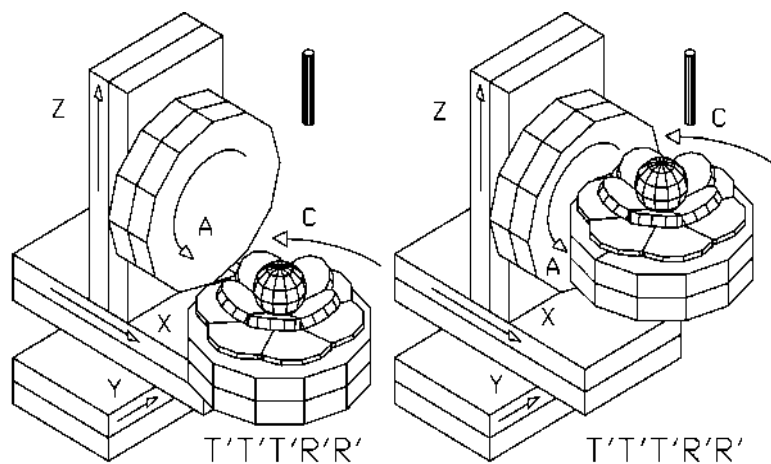


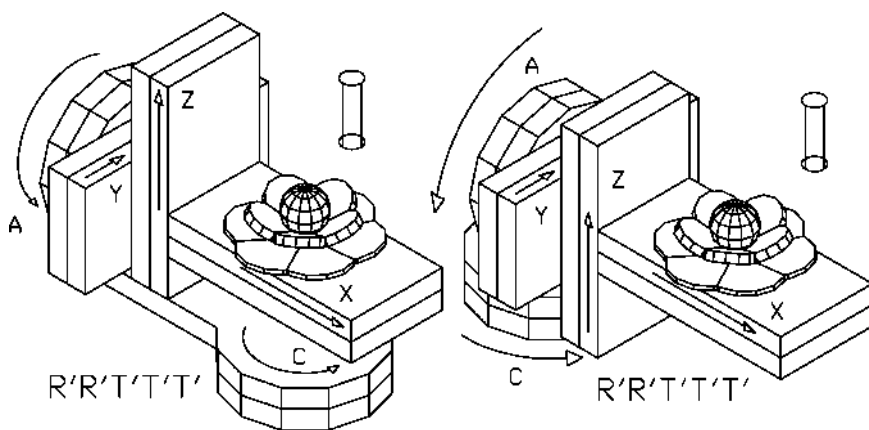
图 14 珠宝的应用程序



模型 I - 偏心距 = 50 mm

模型 I - 偏心距 = 0 mm

图 15 TTTRR 型五轴机床



模型 II - 偏心距 = 150 mm

模型 II - 偏心距 = 0 mm

图 16 RRTTT 型五轴机床

表一 比较两种机床的工作区

	$T'T'T'R'$	模型 I	$R'R'T'T'$	模型 II
偏心距	$e=0$ mm	$e=50$ mm	$e=0$ mm	$e=150$ mm
WS_{MT}	25.13 dm^3	25.13 dm^3	48.0 dm^3	32.4 dm^3
WS_{MT} 剪除	14.57 dm^3	14.57 dm^3	48.0 dm^3	32.4 dm^3
WS_{TOOL} WS_{WORK}	15 dm^3	30.85 dm^3	107.7 dm^3	39.8 dm^3
WR	0.97	0.47	0.44	0.814
最大范围	$\phi 100$ mm	$\phi 100$ mm	$\phi 300$ mm	$\phi 250$ mm
OS:	0.036	0.036	0.29	0.25
OA:	2	2	2	2
空间	32 dm^3	45 dm^3	100.53 dm^3	56.55 dm^3
MTs	0.47	0.57	0.48	0.57

6.4 例二—转盘选择

两台机器使用相同的运动图并且在相同的范围将会比较（图 17）。有两个可供选择的旋转轴：两轴垂直表（模型一），两轴水平表（模型二）。表 2 和表 3 提供的功能比较重要。可以看出，减少轴旋转范围则增加了机床的工作空间。所以模型 I 适合大范围较小工件定位，通常需要轮廓申请。模型 II 将适合大工件的定位与变化较少的工具或将需要两个设置。这种额外的安装要求可能没有那么重要那么大的规模。水平表可以使用托盘的内部体制转换的外部设置。在 B 轴较大的角度范围-105 到+105。模型 I 和模型 II 相比-45 到+20，模型 I 更适合复杂的雕刻表面，还因为高的角速度范围。选择最高的主轴转速，应该选择并且允许使用较小直径的切削刀具导致更少的削弱和较小的切削力。高主轴转速会更容易降低开模电火花加工机床的铜电极。垂直表也更好的去除芯片。但是，大范围的角定位降低了工件的最大尺寸为 300 毫米和 100 公斤。模型 II 与模型 I 具有相同的线性轴范围，但在旋转范围要小的多，可以很容易地处理工件双倍的大小和重量。模型 II 将有利于定位的应用。模型我 I 不能提供自动交换工件，它不适合大规模生产。模型 II 的自动工件交换适用于大规模生产的应用程序。不过模型 I 可以选择定位零件如液压阀外壳，小型的并且需要大角度范围。

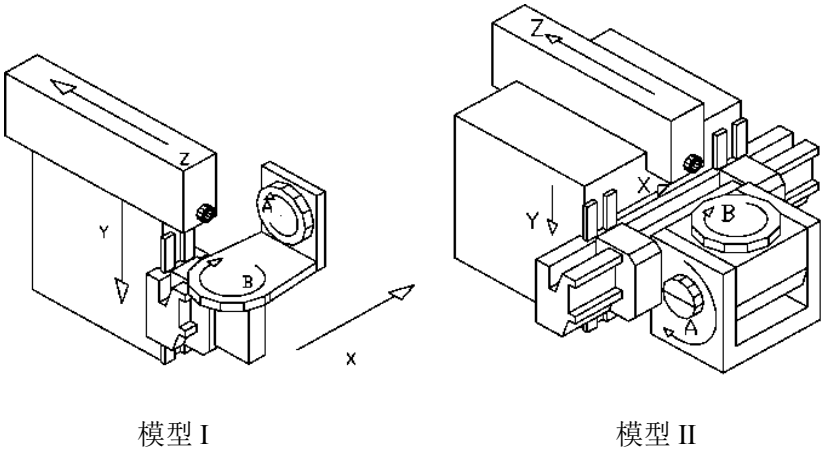


图 17 模型 I 和模型 II 型 TTRRT 型机床

表二 图 17 中五轴机床的规格

机型	模型 I	模型 II
B 轴的范围	-105 to +105°	- 45 to +20°
A 轴的范围	nx360°	nx360°
角速度 °/s	8500/14,000	3000/3000
表的种类	垂直	水平
直径表	320 mm	520 mm
最大负载表	100 kg	200 kg
X Y Z 范围	600x450x500 mm	600x450x500 mm
刀尖	ISO 40	ISO 40
重量	4500 kg	5500kg
交换板	No	Yes

表三 图 17 中五轴机床工作区的比较

	模型 I	模型 II
WS _{MT}	212.0dm ³	145.6 dm ³
WS _{MT} 剪除	84.0dm ³	145.6 dm ³
WS _{TOOLU} WS _{WORK}	334.5 dm ³	180.5 dm ³
WR	0.25	0.81
最大范围	φ300 mm	φ930 mm
OS _I	0.17	0.05
OA _I	1.17	0.36
空间	9000 dm ³	9000 dm ³
MTs	0.037	0.07

7.基于 Stewart 平台的新型加工概念

传统机床结构是基于笛卡尔坐标系的。很多表面轮廓的应用只有通过五轴数控机床加工,才是最合适的。这种五轴机床结构还需要另外两个旋转轴。为了加工精确,达到加工硬度,能够装夹大型工件,又大又重的机械装置是必要的。从经典五轴机床的运动链图表可以看出,在运动链中设计第一个轴来承载后续的轴。因此传输动力将受到链接处惯性的限制。如果有这么样一个机构,它能够在移动工件的时候不带动其它轴,是理想的。一种新的设计理念就是“HEXAPOD”的使用。Stewart^[16]在 1965 年描述了 hexapod 的理论。它最早是由 Gough 和 Whitehall^[20]于 1954 年建成并担任轮胎测试仪。很多可能的使用都被提出来了,但它仅被使用在轻型模拟装置上。原因就在于控制六个执行机构十分复杂。最近由于在计算速度上惊人的加快,计算费用的降低,Stewart 平台技术被美国的两家公司使用,第一台机床是来自美国的 Giddings and Lewis 公司。第二台机床是来自美国 Ingersoll 公司的叫做 HEXAPOD。Hexapods 系统的设计以及其他类似系统有所讨论^[17]。虚拟轴机床的工件的定义以及定位问题也有所讨论^[18]。从机构设计可以看出一旦装刀平台由点到矢量的唯一确定之后,装刀平台仍就可以绕刀具轴旋转。这就极大可能的扩展伸缩致动器对同种编程语言的结合。

8.总结

从理论上讲,有很多方法可以用来制造五轴机床。几乎所有传统的五轴机床都属于 3 根移动轴,2 根转动轴或者 3 根转动轴 2 根移动轴的类型。这一类还可以再细分成为 6 个小群体,720 个例子。只有当考虑三轴实体时,每组仍然有 360 个实体。不同例子根据装夹在运动链上的刀具和工件所在轴的顺序来划分。一旦在工件与刀具的运动链上的转动轴的位置被认为是区分 3 根移动轴和 2 根转动轴的五轴机床时,3 个组可以明显的区分开来。在第一组中 2 根转动轴被应用于工件运动链中。在第二组中 2 根转动轴应用于刀具链中。在第三组中,每个运动链有一个转动轴。每组有 20 个可能的形式。确定选择哪中形式应用到具体领域还是一个复杂的问题。为了解决这个问题,就定义了一些比较检索,例如机床工作空间,

工作空间使用面, 工作方向索引, 工作角索引以及机床空间效率。一个方程来计算机床工作空间, 最大球形直径, 当机床选择好后它就可以用来加工此球形。这些索引的使用有两个例子进行了讨论。第一个就是五轴机床加工珠宝。第二个就是当相同移动轴数范围确定时, 旋转轴的选择。

应用最广泛的五轴机床在运动链的工件端有两个旋转轴。这种结构为机床制造商提供了模块化设计。这种模块化设计, 并不总是从应用的最佳角度看。因为大量理论上可能的配置, 很显然, 特定的五轴机床最适合一组特殊的工件。模块化设计应根据所有的五轴的模块化组合。当前的模块化设计是基于三个线性轴机器。

五轴铣削提供减少装置。这有助于提高精度和减少批量大小。然而, 有一些缺点: (一) 五轴机床价格高; (二) 附加旋转轴造成额外的位置误差; (三) 为了相同的供给在机床轴上更高的切削速度

购买五轴机床之前必须深刻研究被加工产品的范围。这部分应分类为五轴定位或五轴轮廓这两种。用转台机为例很好可以产生旋转的工件, 如压缩机。在工具上侧的一个旋转轴和在工件上侧的一个旋转轴将提供一个较大的工作空间利用率因素。

最近推出的虚拟轴机器有一个主要优势, 高动态响应和高刚性的可能性。然而工作空间利用率与经典五轴机床相比要低得多。这些机器的高刚性的设计使它们非常适合于高速主轴^[19]需要高速铣削的设计。

参考

1. J.A. Baughman, Multi-axis machining with APT, in: W.H.P. Leslie (Ed.), Numerical Control User's Handbook, McGraw-Hill, New York, 1970, pp. 271-298.
2. R.M. Sim, Postprocessors, in: W.H.P. Leslie (Ed.), Numerical Control User's Handbook McGraw-Hill, New York, 1970, pp. 299-344.
3. B.K. Boyd, Five-axis machining, in: Machine Design, May 16 1974, pp. 134-138.
4. P. Bezier, Numerical Control Mathematics and Applications, Wiley, New York, 1972.
5. M. Held, On the Computational Geometry of Pocket Machining, Springer, Berlin, 1991.
6. K. Abdel-Malek, S. Othman, Multiple sweeping using the Denavit-Hartenberg representation method, Computer Aided Design 31 (1999) 567-583.
7. Manfred Weck, Handbook of Machine Tools, vol. 1, Types of Machines, Forms of Construction and Applications, vol. 2, Construction and Mathematical Analysis, vol. 3, Automation and Controls, vol. 4 Metrological Analysis and Performance Tests, Wiley, Wiley Heyden Ltd, 1984.
8. L.-L. Chen, S.-Y. Chou, Separating and intersecting spherical polygons: computing machinability on three-, four, and five-axis numerically controlled machines, ACM Transactions on Graphics 12 (4) (1993) 305-326.

9. B.K. Choi, D.H. Kim, R.B. Jerard, C-space approach to tool-path generation for die and mold machining, *Computer Aided Design* 29 (9) (1997) 657-669.
10. R.B. Jerard, R.L. Drysdale, Methods for geometric modeling, simulation and spacial verification of NC machining programs, in: J. Turner, J. Pegna, M. Wozny (Eds.), *Product Modeling for Computer-Aided Design and Manufacturing*, Elsevier Science Publishers B.V./North Holland, Amsterdam, 1990.
11. R.P. Grimaldi, *Discrete and Combinatorial Mathematics: An Applied Introduction*, (3rd ed), Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.
12. M.G. Kendal, *A Course in the Geometry of n Dimensions*, John Wright and Sons Ltd., 1961.
13. L.J. Erik, S.D. Bohez, R. Senadhera, K. Pole, J.R. Duflou, T. Tar, A geometric modeling and five-axis machining algorithm for centrifugal impellers, *Journal of Manufacturing Systems* 16 (16) (1997).
14. E.L.J. Bohez, T. Mahasan, An expert system for diagnosing CNC machines: a case study, *Computers in Industry* 32 (1997) 233-248.
15. W.W. Luggen, *Flexible Manufacturing Cells and Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
16. D. Stewart, A platform with six degrees of freedom, *The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings 1965-1966*, Vol. 180 Part 1, No. 15, pp. 371-386.
17. G. Pritschow, K.-H. Wurst, Systematic design of hexapods and other parallel link systems, *Annals of the CIRP* 46 (1) (1997).
18. T. Huang, J. Wang, D.J. Whitehouse, Closed form solution to workspace of hexapod-based virtual axis machine tools, *Transactions of ASME* 121 (March) (1999).
19. E.L.J. Bohez, Computer aided dynamic design of rotating shafts, *Computers in Industry* 13 (1) (1989).
20. V.E. Gough, S.G. Whitehall, Universal tyre test machine, in: *Proc. 9th Int. Tech. Congress F.I.S.I.T.A.*, May 1962, p. 117.