

# 复合材料铺丝工艺、软件及设备问题探讨

## Investigation of Fiber Placement Technology, Software and Equipment for Composites

北京新吉泰软件有限公司 胡宁国  
中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 姬竹青

**[摘要]** 结合国内第一台复合材料铺丝设备的应用经验,对零件特征、轨迹驱动、后置处理、仿真、制造工艺及设备进行了相关分析,为复材材料零件自动化制造、铺丝软件开发提供借鉴和参考。

**关键词:** 自动铺丝 零件特征 驱动方式 最小拖曳半径 后置处理

**[ABSTRACT]** Combined with the application experience on the first civil AFP device, this article analyzes part features, driving mode for path, post process, simulation, manufacturing technology, software and device. This study can provide references for the application of AFP software and part manufacturing.

**Keywords:** AFP Part feature Driving mode Minimum steering radius Post Process

从航空航天到汽车(大众 XL1 全身碳纤维复合材料,百公里油耗仅为 0.92L),再到高速列车,复合材料应用越来越广泛。对于复材曲面零件制造,国外自动化生产已经应用了几十年,但国内仍然还停留在手工铺层阶段。手工铺层劳动强度大、产品质量不稳定、材料比较浪费、生产节奏不确定,这些问题严重影响着实际生产和新型号、新产品的研发进程。复合材料零件自动化生产是未来发展趋势,更好地使用软硬件制造出合格的产品需要建立在对软件、硬件、材料和产品的理解之上,将这些资源和因素有机地结合。图 1 是南京航空航天大学 and 北京航空材料研究院开发的国内第一台 7 轴联动自动铺丝机。

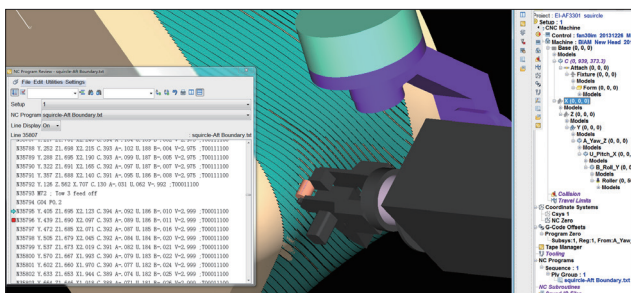


图1 国内第一台7轴联动自动铺丝机  
Fig.1 First 7-axis AFP device in China

## 1 零件设计、软件及设备要求

### 1.1 平面特征沿直线铺丝

为提高铺丝效率高,正常情况下,采用 Zig-Zag 来回双向轨迹方式,减少空行程,提供铺丝路径百分比。但这就对设备精度及反向间隙提出要求,如果设备的反向间隙大,会造成回程铺丝边界不能和去程边界很好贴合,存在间隙,从而影响复材零件的强度。本文采用 One-Way 单向轨迹方式。

### 1.2 平面特征沿曲线铺丝

为了方便理解,沿不同角度斜线进行铺丝说明。实际平面曲线铺丝中可能在测试时才会碰到测试最小拖曳半径等问题。

在一个平面上,沿曲线轨迹铺丝,简单为沿一段圆弧曲线铺丝。由于铺丝压辊有一定长度,造成了在铺圆弧曲线时,压辊与模具表面的接触点线速度不一致,越靠近圆弧中心,线速度相对越小,越远离圆弧中心,线速度相对越大。如图 2 所示, A 处距离圆弧中心近, B 处距离圆弧中心相对远, A 点的线速度相对 B 小。

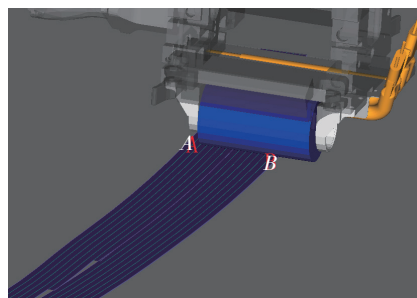


图2 圆弧铺丝  
Fig.2 Plying a circle

对铺丝设备提出这样一个要求:能够单独控制每个丝的线速度,也就是要每根丝被单独驱动,每根丝有对应独立的电机,而且要求它们的线速度能够被精确控制并相互协调,这最终就转化为对铺丝设备的驱动和控制有很高的要求。

### 1.3 圆柱、圆锥等简单曲面铺丝

对于像圆柱、圆锥这样的单曲面特征的铺丝,铺丝角度(铺丝轨迹线与圆柱、圆锥轴线夹角)越大,压辊和

模具的贴合越好,同时参与铺丝的丝束越多,对于同一个零件来说,铺丝的中心轨迹就越多,铺丝效率也越高。例如 90° 铺圆柱面,压辊和圆柱面时线接触,压辊上的所有丝束可以同时参与工作,效率就高;相反,见图 3 中 0° 铺圆柱面时,压辊和圆柱面从理论上讲是点接触,所以每次是最少的丝束参与工作,效率就很低。从工艺角度,圆柱、圆锥面 0° 铺丝工艺很差。

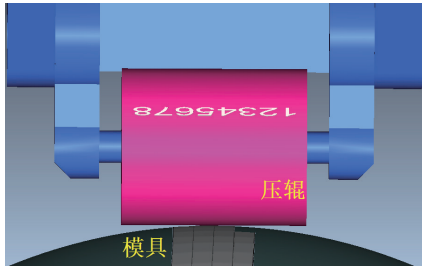


图3 圆柱面0° 铺丝  
Fig.3 0° plying on the cylinder surface

另外,对于圆锥曲面,由于一端直径大,一端直径小,从大端向小端是收缩的。收缩性和圆锥曲面规则性结合将产生规律性增减纱,如图 4 所示,增减纱集中在几个垂直于圆锥轴线的大圆上,这几个大圆处就产生了严重的应力集中,从右端(直径大端)向左端(直径小端)有减纱,而且减纱分布在几处相同的位置,这样对于零件性能零件强度产生了严重的影响。所以在软件编程时,应该在同一层将减纱位置进行错位;在不同层,同一铺层角度起始点也要进行错位,避免局部集中减纱,局部强度严重损失,将减纱合理的分布,增加零件整体强度。

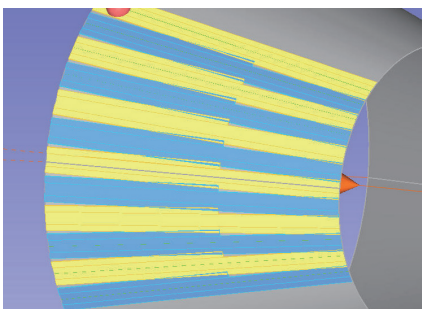


图4 局部放大的圆锥曲面铺层  
Fig.4 Local amplification of plying on the cone surface

#### 1.4 双曲面大扭曲大曲率(小曲率半径)特征

模具的凹面部分,最小曲率半径应该至少大于压辊几何尺寸,这样才能减少压辊在铺丝过程中压不实,丝束在凹面部分产生桥接问题。模具的凸面部分,最小曲率半径也应该足够大,这样可以提高铺丝过程的工艺性。如果凸面部分最小曲率半径特别小,无论什么角度

的铺层,在凸面部分铺层时,都可能发生压辊和模具表面只是点接触,这样如果一次铺多根丝,就可能产生只有中心轨迹线对应的丝束是压实的,其他丝束悬空。当然,压辊有一定的弹性,可以做一定的补偿,但这不能解决问题。

在大扭曲大曲率区域内,每个点对应的法向方向差异就比较大,要求的铺丝角度差异也比较大,如果一次铺多根纱,中心轨迹对应的铺丝角度就无法满足压辊左右两边丝束的角度要求,这样常常就不得不减少一次铺的丝束数量,也就降低了生产效率。在软件系统中,可以根据需要,综合考虑,对轨迹的中心轨迹进行调整,可以进行一些补偿。

对材料的性能参数最小拖曳半径,在铺双曲面大扭曲大曲率零件时是要特别关注的。当铺丝轨迹对应的拖曳半径小于材料的最小拖曳半径,丝束将褶皱或撕裂。所以铺丝轨迹生成的软件系统要根据材料最小拖曳半径参数,对铺丝轨迹进行评价,根据设定的铺丝角度容差,对铺丝轨迹进行修正。

双曲面大扭曲大曲率几何比较复杂,沿着铺丝角度方向,有些区域是收敛的,有些区域是发散的,所以常常会出现一个中心轨迹上多次增减纱情况,如图 5 所示。

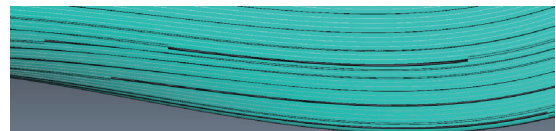


图5 一个中心轨迹上多次增减纱  
Fig.5 Multiple adding or cutting tows on one center path

双曲面大扭曲大曲率几何复杂,角度变化大,铺丝头和压辊本身体积大,在实际生产中很容易发生碰撞过压问题,所以必须模拟仿真。

## 2 零件铺层轨迹生成和驱动方式

在零件铺层轨迹生成方面,优秀的商业软件应该是性能稳定、计算速度快、软件灵活、可操作性强、并且适应性好。软件可适用不同类型产品制造和不同铺层轨迹生成的要求;也可适应于不同结构设备或不同控制系统。材料和铺丝头等参数可在软件制造环境中定义,这样可以应用不同材料铺层或不同铺丝头铺层。软件应该具备良好的数据接口,可以直接上游的设计数据(铺层 ID、每层铺层角度、铺层起始点等)和模型,以准确高效地生成铺层轨迹。

铺层轨迹有很多种方式,也就是说有很多驱动方式生成铺层轨迹,下面以 CGTech Vericut VCP 产品为例进行讨论。

(1) Natural 方式,就是自然法。自然法最大限度保

证材料不变形,轨迹有很大局限性,不能适用于复杂大扭曲零件制造要求。自然法就是将一定宽度的材料放在模具表面,在材料没有被施加压力,没有变形的情况下,其宽度方向上的中心线就是自然法轨迹线。

(2) Rosette rule 方式,相对于自然法,这种驱动方法更能够符合零件设计思想,更能够确保零件制造强度。这种驱动方式是整个铺层轨迹上任意一点的切矢和定轴成任意定角度(常用的是  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $+45^\circ$ )。角度测量运算过程如下,以  $0^\circ$  为例,见图 6。

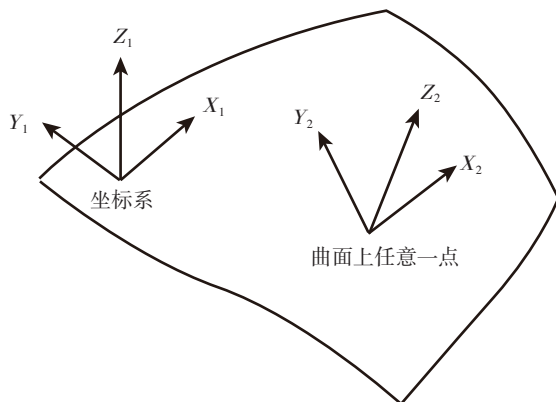
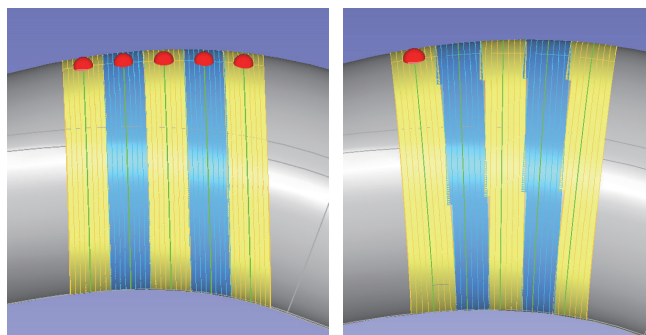


图6 铺层轨迹上任意一点角度测量  
Fig.6 Angle measuring of any point on plying path

- 过曲面上任意一点做平行于参考坐标系为 Rosette  $X$  轴的一条轴线  $X_1$ ;
- 将  $X_1$  投影在模具上;
- 过该点做该投影线的切线  $X_2$ ,  $X_2$  就是铺丝角度在该点的测量基准线;
- 过该点做模具曲面的法线  $Z_2$ ;
- $Y_2=Z_2$  差乘  $X_1$ ;
- $X_2=Y_2$  差乘  $Z_2$ 。

如果零件扭曲比较大,这时候与定轴成任意定角度的驱动方式就无法满足设计需求(参考图 7 (a)),设计



(a) 铺层轨迹与定轴成定角度 (b) 铺层轨迹与曲轴成定角度

图7 与定轴或曲轴成定角度铺层轨迹

Fig.7 Plying at an angle with fixed axes or curved axes

计算角度是参考零件扭曲的曲轴,所以这就需要另一种引申的驱动方法:与曲轴成定角度驱动方法(参考图 7 (b))。该曲轴可能是零件真实的曲轴,也可以是零件扭曲的走势代表曲线。

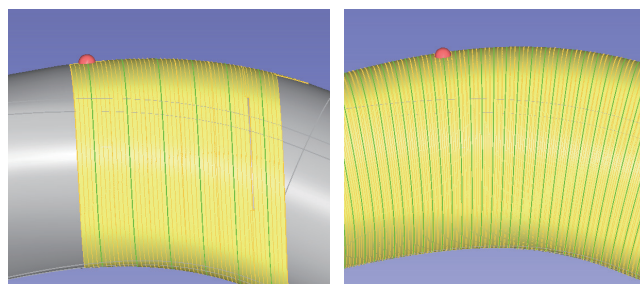
(3) Parallel 方式,对于一般复杂曲面零件,轨迹更规则,在轨迹中增纱减纱相对少,但对于不太匀称的零件,这种驱动方式不大适合。对于扭曲比较大的零件,铺层容易超过铺丝角度容差。轨迹生成方法是,第一条轨迹按照 Rosette rule 方式生成,该层的其他轨迹与第一条轨迹平行。

(4) Rosette/parallel 方式,与 Parallel 方式类似,只是当后面的铺层超过铺丝角度容差时,铺层的驱动方式切换为 Rosette rule 方式。

(5) Natural/parallel 方式,与 Parallel 方式类似,只是当后面的铺层超过材料的最小拖曳半径时,铺层的驱动方式切换为 Natural 方式,接着再按照 Parallel 方式生成轨迹。

(6) Geodesic 方式,主要应用于类似于压力容器类零件。

(7) Spiral 方式,即  $90^\circ$  螺旋轨迹,铺丝轨迹中心线为螺旋线,可以是左螺旋或右螺旋。这种方式大大地减少中心轨迹数量,在优良的材料和设备环境下,可以大大提高铺丝效率,同时也增强了零件强度。一般是与定轴成  $90^\circ$  的螺旋,以 Rosette rule 方式生成轨迹。与曲轴成  $90^\circ$  的螺旋,计算复杂且计算量大,对软件系统要求很高(图 8)。



(a) 铺层轨迹与直轴成  $90^\circ$  螺旋 (b) 铺层轨迹与曲轴成  $90^\circ$  螺旋

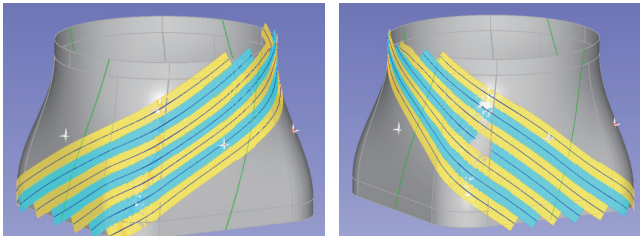
图8 与直轴或曲轴成  $90^\circ$  螺旋铺层轨迹

Fig.8 Plying helix at  $90^\circ$  with fixed axes or curved axes

(8) Guide 方式,通过一条或数条曲线驱动生成轨迹。铺丝角度参考是驱动线,而不是定轴,见图 9 (深色曲线为驱动线)。

### 3 制造工艺和参数

复合材料铺层制造涉及模具、工装、材料、设备、制造环境温度控制、热压罐成形、超声波切削、三坐标测量、C 扫描等。对于自动铺丝来说,材料准备相当重要,



(a) 铺层轨迹与驱动线  $-45^\circ$  定角 (b) 铺层轨迹与驱动线成  $+70^\circ$  定角

图9 与驱动线成任意定角度铺层轨迹

Fig.9 Plying at any angle with the green driving curves

材料缺陷、材料切边宽度精度、材料与被衬粘性、被衬的脱离是否稳定等都影响着零件制造过程的稳定性。在生成铺丝轨迹和评价轨迹可制造性方面,还有一些重要的参数,材料方面如材料厚度、容许的角度偏差和最小拖曳半径;设备方面如铺丝头的丝数、压辊最大压缩量、最小铺丝长度等。软件系统要结合这些参数,根据设定的轨迹边界间隙或重叠量,按照驱动方式生成具体铺丝轨迹,同时根据工艺余量、岛屿、零件边界等对轨迹进行修剪,生成最终的轨迹。

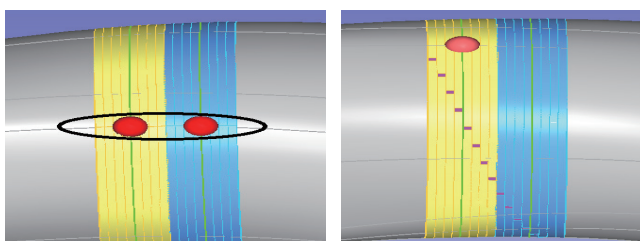
### 3.1 筒形零件大角度铺层时

$90^\circ$  铺层,断纱点全集中在一个位置(图 10 (a) 黑色圈内),成品零件将在此产生应力集中,这对零件整体强度性能产生严重的影响,所以有必要将断纱点位置错位开来,见图 10 (b)。

### 3.2 边界工艺余量

根据工艺需要,设定边界余量。如图 11 所示,3 条轨迹设定边界余量不同,超出边界量不同。

### 3.3 间隙和重叠



(a) 断纱点位置全集中

(b) 断纱点位置错开

图10 断纱点位置控制

Fig.10 Control of the cutting point position

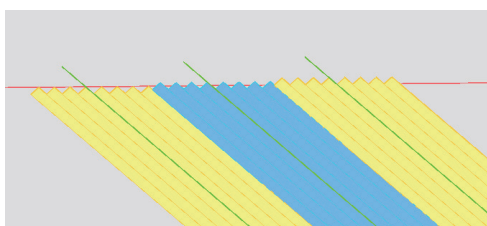


图11 边界和余量

Fig.11 Boundary and allowance

根据工艺要求,控制重叠量,当重叠量超过极限参数数值,在边界处对相应丝进行切断,进而形成间隙,如图 12 所示。可以看出,对于曲面铺层,重叠量和间隙量是相对的 2 个参数,重叠量大时间隙就小,相反,重叠量小时间隙就大。

### 3.4 最小铺丝长度耳朵轨迹处理

在实际中,最小铺丝长度形成的耳朵怎么处理,还要根据具体情况来定。比如设备 Z 方向行程小,可以调整耳朵位置状态如图 13 所示。

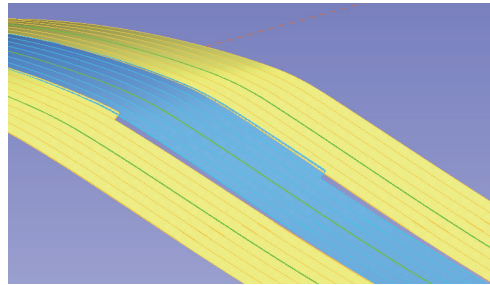


图12 间隙和重叠

Fig.12 Gap and overlap

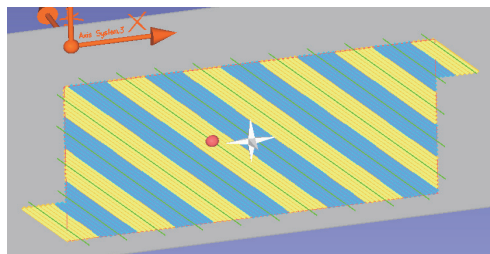


图13 最小铺丝长度耳片调整

Fig.13 Adjusting of the ears of the minimum tow length

### 3.5 工艺边界、凸台、孔及剪切口处理

在实际生产中,需要将工艺边界、凸台、孔、剪切口、工艺余量、最小铺丝长度及起始点等因素综合考虑,生成更符合工艺要求的铺层轨迹,如图 14 (a) 所示,将起始点设置在岛屿中,考虑设备旋转轴行程限制,将铺层轨迹设置为单向走,从左向右方式;另外,在岛屿的右边,岛屿的边界和整个铺层的边界距离小于最小铺丝长度,所以将这些轨迹自动延长,并且将延长的材料放在岛屿这一侧,最终的铺丝轨迹如图 14 (b) 所示。

### 3.6 相同角度铺层起始点错位问题

在一个平板上铺 40 层材料,对应  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$  分别是 10 层,如果所有层用同一个起始点计算铺层轨迹,那么对应一个特定角度,比如  $0^\circ$ ,它的 10 层轨迹投影是重合的,也就是说,这 10 层所有丝的边界是对齐的重合的,这样在边界地方零件强度会大大降低,从而会影响零件整体强度性能,所以应该调整起始点,将丝的边界进行错位,将起始点沿垂直于铺层角度方向偏

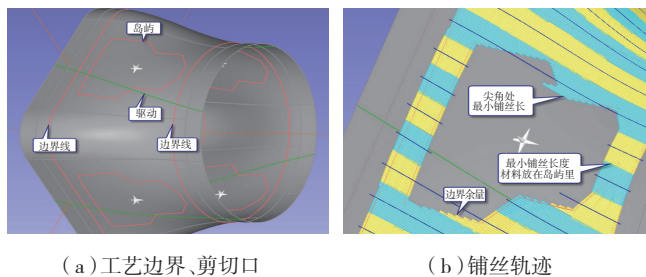


图14 铺丝轨迹生成时对工艺边界、工艺余量、剪切口和最小铺丝长度的处理

Fig.14 Parameters processing at the moment of plying path generation

置丝宽度的非整数倍。

### 3.7 特殊几何特征铺层的处理

如图 15 所示,在模具曲面上有一个大曲率的特征,与应曲率半径特别小,与该特征相邻处曲面又比较平坦。在铺 0° 时,该大曲率特征工艺性很差,理论上压辊和模具是点接触,所以不能一次铺 8 根纱,为了丝束能够很好地贴合模具表面,一次只能铺 2 根纱;但相邻的平坦处如果一次还铺 2 根纱,就大大降低了生成效率,所以生成轨迹时,需要将自动方式和手动方式结合起来,在该大曲率特征处将丝束设为 2 根,在平坦处将丝束设为 6 根,这样就很好地解决了制造工艺问题和效率问题。

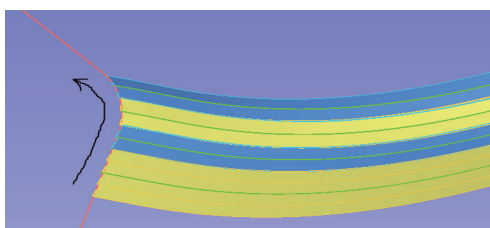


图15 自动和手动结合方式控制的铺丝束

Fig.15 Tow controlled by manual or automatical modes

## 4 后置处理及优化

后置处理是将软件生成的表达压辊的中心轨迹的中性轨迹代码转换为可应用于铺丝设备生产的代码的过程。后置处理是结合设备结构、行程和关键参数如转心距、压辊半径和最小铺丝长度等,根据相应的算法,将程序轨迹上对于插补点位置和矢量转为设备对应轴的位置和角度坐标,并结合相应的辅助指令(如 M 代码)以一定格式输出的过程。

与通用的数控加工一样,后置处理也是很关键的环节。对于铺丝设备,后置处理更关键,也更为复杂。如一般的数控加工设备最多是 5 轴联动,而铺丝设备是 7 轴,要做 7 轴联动,难度就大大增加了。通用的数控机

床 5 轴联动加工已经应用半个世纪,从位置和角度姿态控制应该是没有问题了,但速度还在一直困扰着众多国内外著名的设备厂商,零件很多质量问题都与速度及速度匹配(如何将 3 个线性轴和 2 个旋转轴速度完美地匹配)有关。

对于 7 轴的铺丝设备,如何让 3 个线性轴和 4 个旋转轴更好地协调工作,让压辊和模具表面接触点的相对速度更平稳,问题就更复杂。对于大零件如飞机机头部分,这很重要,由于要制造的零件特别大,它们的模具体形也就很大,质量很重,对应的转动惯量也很大,所以在铺丝过程中保持模具匀速旋转,同时保持铺丝头相对于模具表面速度匀速,只有这样才能更好地控制铺丝过程,避免不稳定因素造成一些质量问题。

以垂直于模具中心线的截面为例,将截面简化为一个椭圆,如图 16 所示。实际上,在模具中心线上不同点,对应的截面可能不同,截面上每一点到模具中心线(也就是机床的安装模具的旋转轴的轴线)距离是不同的。当机床旋转轴带着模具匀速  $\omega$  旋转时,模具截面上不同点,旋转半径  $r$  不同,线速度  $v = \omega \cdot r$  也是不同的。为了维持铺丝头相对于模具表面匀速,所以必须动态改变铺丝头相对运动,补偿由于模具表面不同点对应旋转半径不同而引起的速度变化。当对应点模具表面线速度大时,让铺丝头运动和模具转动方向相同,减少它们之间的相对运动速度;相反,当对应点模具表面线速度小,让铺丝头运动和模具转动方向相反,增加它们之间的相对运动速度;最终铺丝头相对于模具表面匀速,让丝束平稳铺在模具表面上。

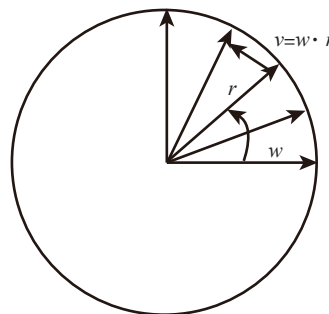


图16 线速度与旋转半径关系

Fig.16 Relation between surface speed and its rotary radius

从理论上讲,给任何复杂双曲面铺材料,最多需要 6 轴联动,所以 7 轴设备中的 1 个轴为冗余轴,在铺丝过程中,对于有些特征它是必要的。通过冗余轴,可以进一步优化接触点的相对速度,使设备运行更平稳;还可以通过该冗余轴,补偿 Z 方向行程范围,进一步扩展设备制造能力。

(下转第 89 页)

[17] 邵冠军,游有鹏,缪群华. 复合材料开孔层合板的纤维铺放路径优化设计. 玻璃钢/复合材料, 2006(4): 31-34.

[18] 邵冠军. 自动铺丝束 CAD/CAE/CAM 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[19] 龚长斌,游有鹏. 自动铺丝束机器人逆运动学问题的解析法. 机械工程与自动化, 2006(1): 1-3.

[20] 龚长斌. 自动铺丝束机械手运动学动力学分析与优化 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[21] 周焱. 复合材料自动铺丝 CAD 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[22] 周焱, 安鲁陵, 周来水. 复合材料自动铺丝路径生成技术研究. 航空精密制造技术, 2006, 42(2): 39-41.

[23] 安鲁陵, 周焱, 周来水. 复合材料纤维铺放路径规划与丝数求解. 航空学报, 2007, 28(3): 745-750.

[24] 安鲁陵, 杨玉岭, 肖军, 等. 复合材料纤维自动铺放过程碰撞干涉检测. 宇航材料工艺, 2007, 37(2): 51-54.

[25] 杨玉岭. 复合材料自动铺丝 CAM 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[26] 孔燕. 八通道自动铺丝张力测控系统方案设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[27] 张旭坡. 自动铺丝预浸纱制备技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[28] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现. 武汉大学学报(理学版), 2007, 53(5): 613-616.

[29] 王念东, 刘毅, 肖军. 复合材料管状结构自动铺丝路径算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(2): 228-233.

[30] 王小平, 安鲁陵, 张丽艳, 等. 基于弧长参数的开边自由曲面构件上纤维均匀覆盖 (英文). Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21: 571-577.

[31] 李善缘, 王小平, 朱丽君. 复合材料铺丝成型中的路径规划. 宇航材料工艺, 2009, 39(2): 25-29, 41.

[32] 李善缘. 复合材料铺丝成型中的路径规划 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

[33] 卢敏, 周来水, 王小平, 等. 锥形复合材料构件的铺丝路径规划与丝数求解. 宇航材料工艺, 2009, 39(6): 15-18.

[34] 曾伟. 复合材料自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[35] 曾伟, 肖军, 李勇, 等. 回转体自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析. 航空学报, 2010, 31(1): 239-243.

[36] 曾伟, 肖军, 李勇, 等. 回转体自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析. 武汉理工大学学报, 2009(21).

[37] 朱丽君, 王小平, 李燕元. 利用分段 G2 插值方法构造铺丝路径. 宇航材料工艺, 2010, 40(3): 18-22.

[38] 朱丽君. 复合材料的自动铺丝技术中的路径计算 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[39] 李燕元, 王小平, 王志国, 等. 管道曲面构件自动铺丝路径规划. 宇航材料工艺, 2010, 40(5): 27-32.

[40] 李燕元. 自动铺丝技术中具有修改机制的路径规划方法 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[41] 卢敏, 周来水, 安鲁陵, 等. 开曲面构件的多层铺丝路径生成算法. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 735-738.

[42] 卢敏, 周来水, 王小平, 等. 圆筒状构件的多层铺丝路径生成算法. 航空学报, 2011, 32(1): 181-186.

[43] 卢敏, 周来水, 王小平. 一种基于投影法的铺丝路径优化生成算法. 中国机械工程, 2011, 22(16): 1993-1996.

[44] 徐涛. 不可解析的类回转体自动铺丝轨迹规划的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[45] 王培源. 基于铺层承载信息的自由曲面自动铺丝轨迹规划技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

本文有参考文献 153 篇, 因篇幅有限未能一一列出, 读者如有需要请与本刊编辑部联系。

(责编 杰一)

(上接第 79 页)

对高质量的程序, 在生产过程中设备运行顺畅, 轨迹光滑, 切矢连续, 角度没有突变, 压辊和模具接触点速度平稳, 工作的丝束在压辊宽度方向相对于接触点对称, 压辊是“拉”着丝束向前运动, 而不是“推”着丝束运动。这需要将软件、设备系统、零件融合考虑, 是综合、复杂的过程。

还有在零件上铺剪切孔, 或者由于曲面形状决定某些丝在一个轨迹的中间几处需要断开, 这时候后置处理要同时考虑对应丝束相应的 M 代码指令, 操作对应丝切纱、压纱、送纱及送纱距离 (最小铺丝长度)。这里要强调送纱最短距离对后置处理的影响, 从切纱点到压辊和模具压紧点之间有一段距离, 如图 17 所示, 距离 80mm, 当需要送纱时, 纱不会马上就被送到压辊下, 需要走 80mm 距离, 所以在到达零件边界 80mm 外就要开始送纱; 相反, 在离开边界或到达岛屿边界之前 80mm 就需要切断送纱。

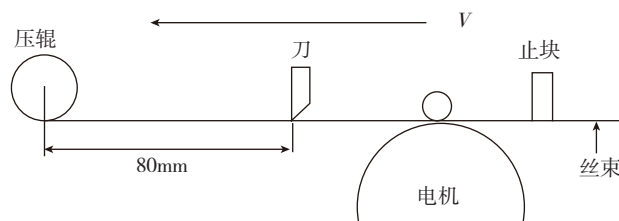


图17 AFP 铺丝机进给系统  
Fig.17 AFP feed tow system

## 5 结束语

复合材料零件自动化制造是趋势, 如何结合设备、材料、模具和工艺要求, 生成高效、稳定、安全的程序代码是复合材料自动化生产的关键, 铺丝轨迹软件编程和铺丝零件制造过程虚拟仿真是制造工艺的必须环节。在铺丝轨迹编程时, 将制造工艺纳入轨迹规划中, 生成适合于生产的程序代码, 通过电脑的虚拟仿真检查, 模拟零件的整个铺丝过程, 确保设备人员的安全。

(责编 杰一)