大型复杂结构的快速纤维铺放

High-Speed Fibre Placement on Large Complex Structures

Dave Regiec
项目经理
ANDANTEX 公司

Andantex Peter Vogeli
首席工程师
Electroimpact 公司

减轻航空飞行器的重量对于提高燃油效率、降低成本，以及长距离飞行和增加载重都非常重要。这方面的创新可由碳纤维的高比强度来实现，而对于高生产率的需求则需要使用极其复杂的机器来实现。

Electroimpact 公司已开发出一套出色的自动纤维铺放系统，铺放速度可达 50m/min。这意味着其具有非常复杂的控制系统和稳定精确的轴驱动系统，美国的 Andantex 公司为该驱动轴提供了所有的关键机械部件。

自动化设备

Electroimpact 公司作为世界范围内航空工业的自动化设备供应商，已经成功开发了一种自动纤维铺放（AFP）技术，其允许在用户要求的铺放误差范围内以 50800mm/min 的速率在倾斜或复杂表面进行切割或添加碳纤维束。所有铺层操作可以通过在两个方向上由操作者控制进料速度来实现，并且对最终裁剪精度没有任何影响。

目前，最大的用户是美国一家大型航空部件制造商，用于生产机身、翼下复合材料结构及机翼。AFP 被设计用来制造大型商用飞机结构，具有全模块化及自动铺放头 30s 内快速变换的机器。为了制造大型飞机部件，其可以控制纤维铺放的 X、Y 和 Z 方向的运动，该设备重量为 175t，能够以 0.2g 的加速度加速。为了提高生产效率，在同一零件上碳纤维丝束（预浸碳纤维窄带）可采用多种材料形式进行铺放，并能保证 100% 无捻，双向操作 100% 无劈丝。碳纤维被铺放在模具表面，X、Y 和 Z 轴及圆柱旋转轴共同作用保证碳纤维符合被制造零件的表面轮廓形状。通过优化不同铺层和不同方向的碳纤维来优化零件的强度，由于碳纤维的拉伸强度较高，作用在零件上的所有载荷都为拉伸形式。X 轴方向的冲程范围为 2~30m，在操作过程中其移动距离由所制造零件尺寸而定。

先进的控制系统

图 1 这款机器包括完整的切割系统（并可以进行二次开发）、优化的给料系统以及两条碳纤维铺放轴架系统，其控制系统可以按指令进行切割，并且在线给料速度可达 50800mm/min 或以上。通常高速切割过程中会出现一系列问题，铺放速率 R 为 50800mm/min，最终切割铺放公差为 ±0.125mm（或总公差 k 为 2.54mm），则时间窗口计算公式如下：

$$T=(60\times k)/R=$$
$$(60\times 2.54)/50800=0.003\text{s}$$

换言之，以 50800mm/min 的速度铺放丝束相当于 0.84mm/ms，因此，此切割系统的总精度和可重复性比典型的 CNC 扫描速率（4~8ms）还要高。每个部件（如驱动器、阀门等）的可重复性应在毫秒的范围以内，因此切割指令系统的精度也必须在毫秒范围以内。

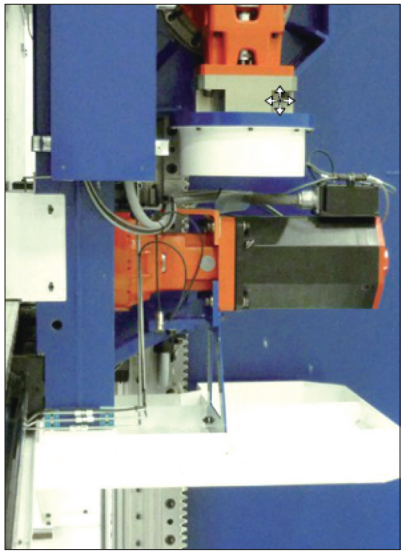

图1　Y（水平）和Z（垂直）轴齿轮齿条驱动系统

图2　龙门式自动纤维铺放机

Electroimpact 公司开发的这款允许高速切割的设备(图 2),能够在 1ms 内完成切割。此外,其稳定性极好,能够保证高速铺放过程中的精度和可重复性。影响在线切割和给料时间的因素包括程序执行、输出模块响应、电磁阀驱动以及驱动机制的气流和惯性响应。相对名义信号,上述每个因素在执行切割和给料过程中都会产生滞后,如果该滞后是可以预测且可重复的,那么切割时间就可以得到补偿。但是,也应尽可能减小这些滞后。经过系列开发和调试后,进料和切割的滞后时间都已降到 1ms 以下,使切割终端和铺放初始端在很高的速度下也能保证精确度。

传统的控制系统如 PLCs 或 CNCs 通常基于“扫描时间”进行操作,典型精确度为几毫秒。每进行一次扫描输出一次,因此扫描时间的精度受到限制。速度为 50800mm/min 时,延迟 1ms 就将导致 0.84mm 终端铺放误差,因此,在高速自动切割和给料时,即使是 1ms 的误差也不能接受。因此,要求将 CNC 运动控制系统与切割和给料指令时间紧密集成,将延迟时间降低到最小。

Electroimpact 公司选择 Fanuc 公司的 Customer Board 系统,使在 CNC 的速率指令水平上将切割和给料指令插入运动文件成为可能。这是 Customer Board 系统首次在日本以外使用,Electroimpact 与 Fanuc 紧密合作将其应用于 AFP。微秒范围内的控制时间延迟可以有效地消除切割和给料延迟误差。

Electroimpact 的用户已经意识到需要一种程序作为日常升级和维护软件的标准套件被提供。过去两年,公司与 CG-Tech 合作研发了名为 Vericut 复合材料程序和模拟套件的 AFP 程序软件。

独特的方案

根据 Electroimpact 对高速、设备笨重、各个方向复杂的运动和频繁的加速度等方面的需求,美国 Andantex 公司面临最艰巨的挑战。

首先需要消除反弹,TwinDRIVE 齿轮齿条驱动系统由两条平行安装的行星伺服减速器组成,并配备电路。预加载系统可消除反弹且使伺服系统精确控制轴的位置。其次,由于频繁的加速需要高刚度以确保完美的可重复性,通过增强输出轴承支撑整体齿条与输出轴来保证各个方向的高刚度。这种独特的 Redex Andantex 理念具有市场上最好的扭转刚度性能,值得注意的是它还可以为径向和轴向平面提供额外刚度,相对于其他方案会产生双倍的加速度和重量。这种卓越的设计能够增强输出轴承与整体齿条整合到输出轴(表面坚硬、耐磨且与轴具有相同尺寸)上。优化齿轮斜度尺寸以确保最佳扭曲和刚性。轴承阵列由两个经过预加载的过盈配合锥形滚动轴承组成其紧密支撑齿条的受力点,仅使齿条与输出轴承之间的距离保持一个锁紧螺母的厚度。这种特殊设计有效地减小了径向偏离(总偏离量的 60% 都由径向偏离引起),且很少被其他系统有效采用。

直轴、旋转轴和齿轮齿条

Andantex 公司的设备遍布各种机器轴,其在全球机械设备行业已形成独特的风格。圆柱形旋转轴驱动模具转动使碳纤维铺放到模具表面,模具通常由具有低热膨胀系数的 Invar 钢制造。完成纤维铺放后,整个模具和零件组合被移到热压罐加热,使被浸渍的纤维固化到最终状态。固化完成后,模具被取出,剩余部分即为碳纤维复合材料零件。

X 轴由 4 个 KRP 行星减速器组成,尺寸为 6(Redex Andantex 公司的最大尺寸),可确保旋转精度,其与长度为 35m 的齿轮啮合。*Y* 轴由两个 TwinDRIVE 形式的 SRP 行星减速器组成,其安装在 5.5m 长的齿轮上。

对于 *X* 轴和 *Y* 轴上的二级编码器反馈系统,Electroimpact 也采用了 Andantex 的 PDP “分离齿条”直接从齿轮驱动编码器,零反弹。这种低成本方案为高精度齿轮齿条应用领域的第一代“预紧双齿条”。PDP 由两组耐磨 WMH 齿轮组成,每一组齿轮长度的一半通过专有预紧系统联到一起以消除齿轮齿条啮合反弹作用。PDP 创新理念提出了直接从齿轮驱动的编码反馈系统,确保了低成本的高精度定位和可重复性。

最后,Andantex 为 Electroimpact 提供了用于 *X* 轴和 *Y* 轴的模块 10 和 5 的超硬耐磨斜齿轮以及自动润滑齿轮的聚氨酯泡沫润滑齿条。为了提供适合 *X* 轴长度所需的齿条,齿条被设计成每根 1m 或 2m 的长度,每根之间的端部互相连接在一起。这意味着 Andantex 可以提供伺服机器和轴等所有机械部件。

综上所述,以最大速率工作时,铺放精度等于切割精度(误差 ±0.125mm)。Redex Andantex 的轴驱动系统精度高于 ±0.125mm,这些系统共同作用形成一个复杂的形状。估计 *X* 轴、*Y* 轴和 *Z* 轴的精度为铺放精度的 1/10 或 ±0.0125mm。

(翻译　王迎春　责编　深蓝)