

# 基于视觉信息处理的飞行器型面法向矢量的在线测量方法

## Aircraft Surface Normal Vector on Line Measuring Method

### Base on Visual Information Processing

中航工业北京航空制造工程研究所 张为民

**[摘要]** 分析了现行飞行器制造过程中,型面法向测量所存在的技术缺陷,提出了一种基于点组合结构激光和视觉信息处理技术的在线测量新方法。该方法可有效解决飞行器制孔加工过程中对复杂曲面法向的精确控制问题。

**关键词:** 视觉信息处理 激光测量 三维测量 数字控制

**[ABSTRACT]** By analyzing the technical lacuna of surface normal vector on line measuring used in aeronautic manufacturing, We get a new method based on lattice laser and visual Information Processing. It can be useful in aeronautic manufacturing to resolve the problem of precision controlling surface normal vector for drill machining.

**Keywords:** Visual information processing Laser measurement 3D measurement Numerical control

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.043

## 1 飞行器蒙皮制孔过程中采用的法向测量方法所存在的问题

随着各种飞行器量产需求的增加,为提高蒙皮制孔工效、保障制孔与连接质量需要,某单位从国外引进了多台数控钻铆设备用于飞行器蒙皮的制孔和连接,但面对曲率多变、陡缓不一的飞行器蒙皮外型面,数控制孔需解决的关键问题是如何准确获取每个飞行器蒙皮制孔位置上的法向矢量信息。

由于数控钻铆系统加工过程是完全按照数控编程进行的,如果不能正确获取蒙皮外型面制孔位置上的法向信息,其制孔过程就只能僵化地按照控制指令执行,即使制孔加工方向与制孔位置上的法向发生严重偏离也难以进行及时调整,也将使制孔加工质量受到严重影响。

目前,在数控制孔系统应用中,为获取制孔位置域上的法向信息所采用的技术手段主要有:

(1)对制孔位置域的曲面法向矢量进行离线测量标定,并将测量与标定结果融于数控编程中的离线方法。

(2)通过多点等距测量以间接获取曲面法向信息,

并据以调整主轴加工方向的在线调整方法。

离线方法要求预先定出飞行器蒙皮上的每一制孔位置,先期标定出制孔位置的法向矢量信息以供数控制孔的工艺编程。该方法虽可相对保证获取制孔位置法向信息的准确性,但因前期测量工作量大,且测量标定与制孔加工设备彼此独立、时序过程分离,其信息传递可靠性受到干扰,制孔工作质量和效率受到不利影响。

多点等距测量跟踪调整方法的设备结构如图1所示。在主轴四周的几个固定位置上设置有多个与主轴同向的相对位置传感器。该方法的测量、跟踪调整原理如图2所示。

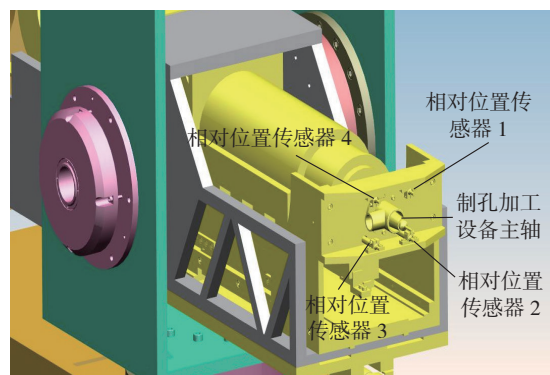


图1 多点等距测量在线调整法向方法的制孔设备结构图  
Fig.1 Drilling device structure of surface normal vector on line measuring

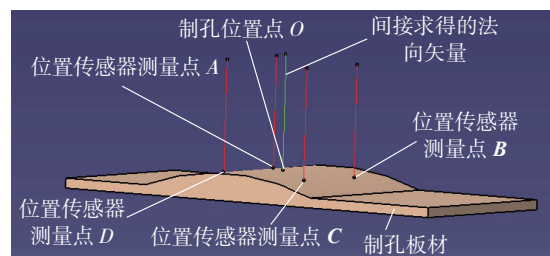


图2 多点等距测量在线调整法向方法的原理示意图  
Fig.2 Sketch of surface normal vector on line measuring

该方法以平行空间平面各处间距均匀相等作为设计基础,图中各红线的起始端位于图1所示的相对位置传感器的固定端面上(垂直于制孔设备主轴),其末端位于制孔板材型面上各红线的长度代表相对位置传感器

测得的各测量点与相对位置传感器固定端面间的距离,图中绿线表示制孔点位置处的法线。

当按设计要求于蒙皮外型面指定位置上进行制孔加工时,主轴对制孔位置点的定位与法线方向的调整过程为:

(1) 启动相对位置传感器,测量外型面指定位置域上的测量点与相对位置传感器固定端面间的距离。

(2) 若指定位置域上的多个测量点与相对位置传感器固定端面间的距离不等,则说明相对位置传感器的固定端面与各测量点形成的空间平面不平行。

(3) 控制系统根据各相对位置传感器的测量结果不断调整主轴加工方向,直到2个空间平面彼此平行为止。

(4) 上述2个空间平面彼此平行,表明主轴方向正处于各测量点形成的空间平面的法线方向,控制系统可看作已将主轴调整到了制孔加工的法向上。

以上过程中测量点形成的空间平面面积因位置传感器的安装空间问题而难以做到足够小,故这一方法仅适用于在曲率不大的飞行器蒙皮外型面上得到一个趋近于型面法向的测量、跟踪、调整结果,而对于曲率较大的飞行器蒙皮的制孔,由于技术原理局限,即使进行更为繁琐、复杂的测量、跟踪和调整也难以获得一个较为准确的法向矢量控制,甚至可能完全找不到所要求的法向信息。

## 2 视觉传感器系统与飞行器型面法向矢量数字化在线测量的实现

为克服现有系统在获取蒙皮外型面法向矢量技术上的局限,引入了视觉信息处理技术,以在线直接测量型面法向矢量的新方法取代离线式、渐近跟踪、调控方式获取蒙皮外型面法向矢量的传统方法。

以视觉信息处理方法实现型面法向矢量数字化在线直接测量的技术原理如图3所示。

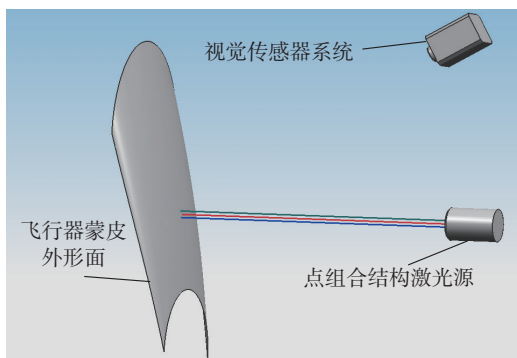


图3 飞行器型面法向矢量数字化在线直接测量方法  
Fig.3 Aircraft surface normal vector on line measuring

图中视觉传感器与点组合结构激光是构成法向矢量数字化在线直接测量系统的主体,其中点组合结构激光光源是由3个等距分布的点激光源构成,射出的三束射线为3条空间平行线。作为与数控制孔设备一体集成的光电测量系统,此三束激光射线的初始方向应同向平行于数控制孔设备的主轴方向,即由点激光源构成的三角阵面,在设计上应与主轴方向垂直。光电测量系统的关键部分是已被进行严格标定了像素阵列的视觉传感器,在设计上该视觉传感器的取景轴线应与以上处于中间位置的激光射线保持在同一平面,且设置成与激光射向成一固定角度,当上述三束激光射线被投射到某一飞行器蒙皮外型面制孔位置域上时,视觉传感器所采集到的图像信息如图4所示。

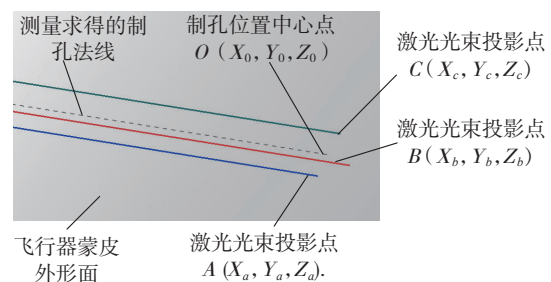


图4 飞行器蒙皮制孔位置域上的视觉信息示意图  
Fig.4 Visual information sketch

图中用红、绿、黄3条异色线代表三束激光射线,A、B、C3点为三束激光在飞行器蒙皮上的投影点,由于视觉传感器的像素阵列对应于三束激光射线在其取景视场内所可能投影到的物理空间已进行了严格标定,结合标定结果,这一视觉信息采集系统可对采集到的三束激光于取景视场内的投影图像进行处理,从而得到3个激光投影点对应于主轴端原点的相对空间位置坐标。如图4所示,三点坐标分别为 $(X_a, Y_a, Z_a)$ 、 $(X_b, Y_b, Z_b)$ 、 $(X_c, Y_c, Z_c)$ ,位于三角形ABC当中制孔位置中心点P的位置坐标则为 $(X_0, Y_0, Z_0)$ 。

当由A、B、C3点形成的平面三角形面积足够小时,该平面三角形中的制孔位置中心点P $(X_0, Y_0, Z_0)$ 的法线矢量,可看作是飞行器蒙皮外型面制孔位置上的法线矢量。

由5个运动坐标(X、Y、Z、A、C)构成的数控制孔加工机床机械结构如图5所示。

由于视觉传感器根据标定资源对采集到的视觉信息进行数字化处理即可取得上述3个激光投影点的相对空间位置坐标: $(X_a, Y_a, Z_a)$ 、 $(X_b, Y_b, Z_b)$ 、 $(X_c, Y_c, Z_c)$ ,故这一基于视觉信息处理方法对曲面任意指定位置域的法线矢量进行测量的数学解析过程为:

(1) A、B、C3点所形成的两组空间直线向量可表

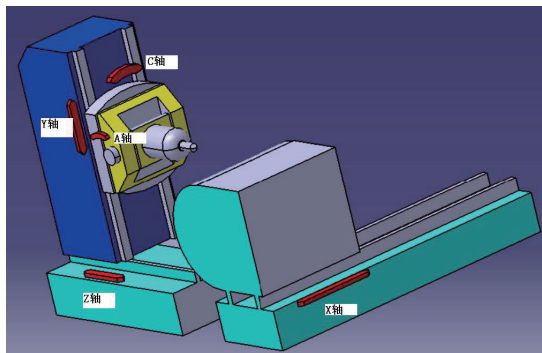


图5 五坐标数控制孔加工机床的机械结构

Fig.5 Structure of CNC drilling machine tool with 5 axes

示为:

$$\vec{AB} = (X_b - X_a, Y_b - Y_a, Z_b - Z_a) \text{ 与}$$

$$\vec{AC} = (X_c - X_a, Y_c - Y_a, Z_c - Z_a);$$

(2) 由 A、B、C 3 点所行成空间平面的法向矢量则表示为:

$$\vec{AB} \times \vec{AC} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ X_b - X_a & Y_b - Y_a & Z_b - Z_a \\ X_c - X_a & Y_c - Y_a & Z_c - Z_a \end{vmatrix},$$

这一方向向量可简化表示为:  $(l, m, n)$ ;

(3) 经过 A、B、C 3 点所行成空间平面中的制孔位置中心点  $P(X_0, Y_0, Z_0)$  的法线方程参数式可表达为:

$$\begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad t \in R; (l^2 + m^2 + n^2 \neq 0),$$

其中  $(l, m, n)$  为该平面的法向矢量;

(4) 如果处于测量位置上的主轴端原点所在水平面方程为:  $z=z_p$  (为常数), 将此平面方程与上述(3)中的法线方程参数式联立, 可求得该法线与制孔加工主轴端原点所在的水平面固定交点  $(x_p, y_p, z_p)$ ;

(5) 主轴端原点将由测量状态下的空间位置  $(x_0, y_0, z_0)$  运动至这一法线与其水平面的交点位置  $(x_p, y_p, z_p)$ ;

(6) 在位置  $(x_p, y_p, z_p)$  上, 设矢量  $L_0=x_p-x_0, M_0=y_p-y_0, N_0=z_p-z_0$ , 则

$$\cos \alpha = \frac{L_0 + M_0}{\sqrt{L_0^2 + M_0^2 + N_0^2}},$$

$$\cos \beta = \frac{M_0 + N_0}{\sqrt{L_0^2 + M_0^2 + N_0^2}},$$

$$\cos \gamma = \frac{N_0}{\sqrt{L_0^2 + M_0^2 + N_0^2}},$$

其中的  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为上述法线相对于 XY 平面、YZ 平面及 Z 轴的空间夹角,  $(L_0+M_0$  与  $M_0+N_0$  为矢量和)。根据对制孔位置域上的法向矢量测量结果, 端心原点位于  $(x_p, y_p, z_p)$  位置, 且主轴加工方向垂直于水平面时,

其 A 轴和 C 轴在分别旋转一定的角度(具体数据为  $\alpha$  和  $\beta$ ) 后, 就可使得经主轴端原点的制孔加工方向线与制孔位置域上的法线相重合, 数控系统只需控制 X、Y、Z 运动轴的速度, 使之以: X 速度: Y 速度: Z 速度 =  $|L_0| : |M_0| : |N_0|$  的速度比例关系驱动主轴的加工运动直至制孔加工终点, 即实现了在正确的法向矢量方向上的制孔加工, 整个过程中主轴的姿态变化如图 6 所示。

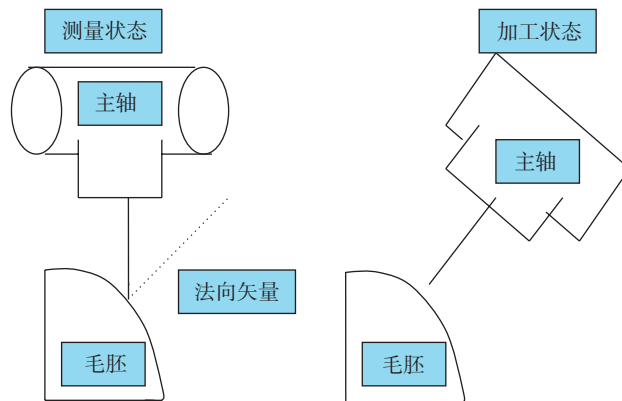


图6 主轴在测量和加工过程中的状态变化  
Fig.6 Course of measuring and machining

### 3 点组合结构激光视觉信息的对应空间标定方法

这里所指的标定是在经过严格测量的取景空间内将图 3 所示的由点结构激光与 CCD 构成的视觉传感器系统所采集到的, 对应于已测量空间位置的视觉信息进行分析、处理, 从而获得视觉信息相对于物理空间的位置对应关系, 为三维空间的点位测量提供信息处理依据。

如图 3 所示, 由于 3 点式激光组合中各点激光源的安装位置是经过精确设计的, 因此其各自间的相对位置关系是固定和准确的。若以图 6 所示的测量状态对指定的曲面进行非接触式的相对位置测量, 可得到曲面上各激光束投影点对应于 XZ 平面的相对位置坐标, 但决定其各自空间坐标位置的 Y 向坐标数据则须由视觉传感器系统借助于预先的标定结果, 对所采集的视觉信息进行处理后方可获得。对于图 3 所示的视觉传感器系统, 当以图 6 所示的状态进行测量时, 需要通过标定工作解决的问题是确定激光束投影点在 CCD 像素阵列上形成的视觉信息位置, 以及它与物理空间中激光束实际投影点位置之间的对应关系。

为实现对该视觉传感器系统的标定, 需首先建立一套以数字化控制运动平台为基础的高精度单轴视觉传感器系统标定平台。图 7 为该平台的示意图。

如图 7 所示, 由 CCD 和点组合结构激光构成的视

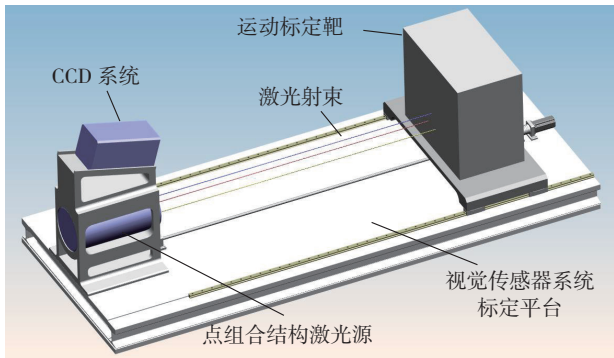


图7 单轴视觉传感器系统标定平台示意图  
Fig.7 Visual sense system calibration stage with single shaft-driven

觉传感器系统固定安装于数控运动平台的一端,作为标定目标靶的立方体可受控地沿激光射束方向进行单轴运动。在设计上,立方标定靶的受光面正向垂直于激光射束线。

视觉传感器系统的标定可通过下列过程实现:

- (1) 将标定平台上的某一位置视为初始端,以定位控制的方式驱动标定靶至初始位置,并记录定位完成后的位置测量信息。
- (2) 视觉传感器系统向标定靶投射点组合激光,同时采集落于标定靶正面由激光点形成的视觉信息。
- (3) 视觉传感器系统经对视觉信息解析处理(像素细分与二值化处理)可得到一组由激光点中心成像于像素阵列上的行列位置数据。
- (4) 控制移动标定靶于不同位置上,在记录位置测量信息的同时采集落于标定靶正面,由激光点形成的视觉信息。
- (5) 将步骤(4)所获得的视觉信息经步骤(3)进行信息处理,可获得对应一系列不同位置上的由激光点中心成像于像素阵列上的行列位置数据。
- (6) 通过对一系列有位置对应关系的数据进行归纳分析,可确定视觉传感器系统进行空间位置测量所要依据的信息处理数学模型。

由于构成点组结构激光源的各点激光间相互位置是确定的,在确定激光投影点相对于系统原点的空间位置时,借助于上述过程所产生的标定结果可直接得到其在视觉传感器系统取景空间内相对于取景原点的空间位置坐标,由此实现了视觉传感器系统对指定空间点位置的数字化测量,进而为指定曲面位置域上的法向矢量测量提供数据支持。

#### 4 法向矢量在线测量与自动制孔系统的一体化

基于视觉传感器的法向矢量在线测量需要与具有多轴运动控制功能的数控制孔系统融合后,方能有效将

测得的法向信息用于复杂型面的制孔加工。首先要实现机械上的整合,使基于视觉传感器的法向矢量在线测量系统在结构上成为整个数控制孔设备的一部分。在整合装配上,视觉传感器系统的激光射束方向必须与数控制孔设备的主轴同向,其装配示意如图8所示。

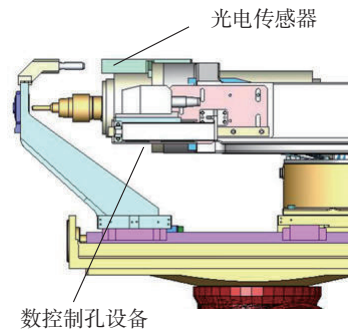


图8 视觉传感器系统与数控制孔设备的装配整合  
Fig.8 CNC drilling machine tool with visual sense system

为保证视觉传感器系统在线应用与标定过程结构状态的一致性,理想的方式是在完成整合装配后,可直接利用制孔加工平台进行对视觉传感器系统的标定,使视觉传感器系统的标定结果与在线应用的空间对应关系更为简单和精确。

因制孔设备运动控制平台与自动标定平台往往是彼此独立、分别工作的两个系统,视觉传感器系统与数控制孔设备的整合必须要在姿态和方向上保证接近于前述的理想方式,通过精准测量后修正装配所产生的位置偏差。测量信息须嵌入运动控制系统以进行在线控制下的调整和补偿,并在此基础上完成两个独立系统间的信息融合。

根据视觉传感器与数控制孔两个系统信息特征的不同,其信息融合表现为如图9所示的2种方式。

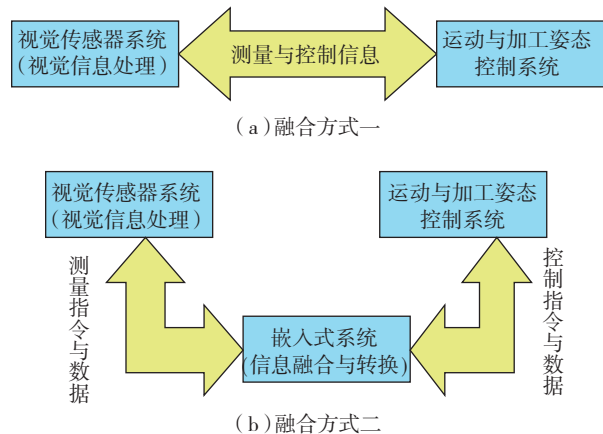


图9 视觉传感器系统与运动控制系统的信息融合方式  
Fig.9 Mode of information link for visual sense system and CNC

(下转第87页)

棱管和方管的破坏模式来看,其在准静态压溃和重寄压溃载荷下,都会在棱边产生较大裂纹并迅速逐渐扩展,形成规则的层束,所以二者在准静态压溃和冲击压溃中的比吸能差别较小。

#### 4 结论

本文对圆形、正六边形、正方形截面复合材料管在不同压溃载荷下的破坏吸能特性进行了数值分析。首先,与文献[9]中的准静态压溃试验进行对比,验证了建模方法的准确性;然后建立了具有几何等效结构的六棱管和方管有限元模型,并对3种类型复合材料管在准静态和冲击压溃下的破坏吸能特性进行了数值分析。结果显示,复合材料管的截面形状会直接影响其破坏失效模式,加载条件的不同也会在一定程度上影响复合材料管的吸能特性。在3种复合材料管中,圆管的吸能能力最强,但其压溃载荷峰值较大,而六棱管在压溃过程中表现出较高的比吸能和较低的载荷,具有较好的综合吸能性能。

#### 参考文献

- [1] 冯振宇,邹田春. 复合材料飞机结构合格审定. 北京: 航空工业出版社,2012.
- [2] 范金娟,程小全,陶春虎. 聚合物基复合材料构件失效分析基础. 北京: 国防工业出版社,2011.
- [3] 杜星文,宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计. 北京: 科学出版社,2004.
- [4] 李喆,孙凌玉. 复合材料薄壁管冲击断裂分析与吸能特性优化. 复合材料学报,2011,28(4): 212-218.
- [5] Paolo F, Bonnie W, Francesco D, et al. LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen. Composites: Part A,2011,42: 1809-1825.
- [6] Francesco D, Bonnie W, Paolo F. Crushing of composite structures: experiment and simulation. 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm Springs, California,2009.
- [7] Joosten M W, Dutton S, Kelly D, et al. Experimental and numerical investigation of the crushing response of an open section composite energy absorbing element. Composite Structures,2011,93: 682-689.
- [8] Hamidreza Z, Matthias K, Henrik A. An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. Composite Structures,2008,85(3): 245-257.
- [9] HUANG J C, WANG X W. Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes. Composite Structures,2009,91: 222-228.
- [10] LS-DYNA keyword user's manual, Version 971, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA,2006.
- [11] 陈永刚,益小苏,许亚洪,等. Carbon-Epoxy 圆管件的静态吸能特征. 航空学报,2005,26(2): 246-249.

(责编 玲犀)

(上接第 42 页)

转速增大而减小,随进给速度增大而增大。此外,进给速度越大,切削力随转速的变化幅度越大

(2) 铜网结构的加入对 CFRP 加工表面质量没有明显影响。随着转速增大,45° 纤维层上空洞数量增加,深度减小且表面树脂涂覆逐渐增多;随着进给速度增大,45° 纤维层上的空洞变深变广,树脂涂覆减少,层间分界更加清晰,加工表面粗糙度值随着转速增大呈减小趋势,随进给速度增大呈增大趋势。

(3) 铜网结构与碳纤维对刀具的磨损作用不同,导致了刀具上非均匀磨损的出现。金刚石涂层硬质合金刀具铣削加工表面铜网结构 CFRP 时的磨损形式主要为涂层磨穿、基体磨钝。

#### 参考文献

- [1] 张元卿,刘兴宇. 新型复合材料结构防雷击胶膜性能验证及应用. 科技创新导报,2012(27): 41-42.
- [2] 王巍,陈燕,牟娟,等. 钎焊金刚石工具磨削 CFRP 的试验研究. 金刚石与磨料磨具工程,2012,32(1): 15-18.
- [3] Zitoun R, El Mansori M, Krishnaraj V. Tribo-functional design of double cone drill implications in tool wear during drilling of copper mesh/CFRP/woven ply. Wear,2013.
- [4] El-Hofy M H, Soo S L, Aspinwall D K. Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. Procedia Engineering,2011(19):94-99.
- [5] 李桂玉. 叠层复合材料钻削加工缺陷产生机理及工艺参数优化[D]. 山东: 山东大学,2011.

(责编 古京)

(上接第 46 页)

当视觉传感器系统与运动控制系统间信息接口相容、信息协议一致、信息时序匹配、彼此对于信息交换可进行自主编程时,其信息融合可按图 9(a)所示的方式进行。该方式通常适用于 2 个系统的信息特征,都为可自主再造的情况。对于 2 个完全独立且非自主研发的系统,彼此间的信息特征是很难实现无条件匹配的,对此可采用图 9(b)所示的系统信息融合方式,该方式的特点是在视觉传感器系统与运动控制系统之间置入了一套嵌入式系统,以完成测量与控制间 2 种信息特征的转换,从而使信息在接口形式、协议组合、时序特点等方面相互匹配,实现测量和控制信息的无缝融合,尽管在结构上较复杂,但其适用性更为广泛。

综上所述,通过测量与控制的多源信息共享,使测量与控制的多系统软、硬件得以相互关联,从而使这一非接触测量借助系统控制得以正确进行,同时系统的运动控制也使测量数据结果得以在线验证。

(责编 古京)