

面向汽车覆盖件模具快速开发的金属喷涂机器人研究

何仲赞, 卢秉恒, 朱东波, 王伊卿, 洪 军

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种新型的机器人手腕机构和基于 STL (Stereolithography) 模型分层数据的运动控制技术, 在此基础上, 研制了基于金属电弧喷涂和电刷镀技术的快速制模工业机器人. 该机器人为 5 自由度直角坐标型结构, 手腕采用了通过特别设计的一个连杆机构, 当利用该手腕机构调节电弧喷枪的姿态时, 喷枪工作点的空间位置会保持不变, 因此解决了在传统机器人中姿态调节机构与位置机构存在的非线性运动耦合的问题. 机器人以模具 STL 模型的分层数据作为控制系统的输入, 无需人工编程即可自动完成金属电弧喷涂和电刷镀模具制造工艺. 在汽车新车型开发和样车试制中, 应用该机器人制作覆盖件模具, 可以显著降低开发成本, 缩短试制周期.

关键词: 汽车覆盖件模具; 金属电弧喷涂机器人; 手腕机构; 运动控制

中图分类号: TP242.12; TG305 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)11 - 1173 - 05

Novel Metal Arc Spraying Robot for Rapid Tooling of Large Sized Automobile Body Panel Dies

He Zhongyun, Lu Bingheng, Zhu Dongbo, Wang Yiqing, Hong Jun

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A creative robot wrist consisting of link mechanisms and a novel robot motion control method based on cross-sectional vector contours of STL formatted model was proposed. By using the wrist and the control method, an industrial robot of five degrees of freedom for rapid tooling by using metal arc spraying and electric brush plating techniques was developed. The wrist of the robot including a special designed link mechanism can maintain the position of the spraying point on the surface of the master pattern whatever alternating the orientation of the gun. Therefore the kinematic nonlinear coupling between the position mechanism and orientation mechanism of traditional robot can be avoided. The only input of the control system is the STL formatted 3D CAD model of the pattern. Without any manual programming, the metal arc spraying and brush plating (if necessary) processes can be performed automatically and efficiently after receiving the 3D CAD data of the pattern. Using this robot system in new car development and trial production, the cost and lead time can be reduced substantially as compared with the conventional tool making method.

Key words: automobile body panel dies; metal arc spraying robot; wrist mechanism; motion control

汽车样车试制模具(覆盖件简易模具)的制造直接决定着新车型开发的成本和周期. 但是, 在国内外覆盖件金属模具的主流制造技术中, 如消失模铸造技术、大型精密数控铣削加工技术、高速数控铣削加

工技术等, 由于存在着生产周期长、费用高的问题, 因此难以满足样车试制和小批量生产的要求. 目前, 国内外都在寻求成本低、周期短的覆盖件模具试制技术, 根据材料与制作方法的的不同, 这些覆盖件模具

收稿日期: 2004 - 03 - 31. 作者简介: 何仲赞(1967 ~), 男, 博士生; 卢秉恒(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA421270); 国家科技攻关“十五”计划专项经费重点资助项目(2001BA203B10 - 01).

可分为树脂模具、金属喷涂模具、低熔点合金铸造模具,以及基于层叠法制造的薄钢板层叠模具和高密度混凝土模具(模具的工作表面为金属粉强化聚合物)等^[1-3].在这些覆盖件模具的制造方法中,近年来发展起来的金属电弧喷涂制模方法对于大中型模具的制造在周期和成本方面具有很大的优势,并且模具工作表面具有较好的强度、硬度和耐磨性,因此是制造汽车覆盖件试制模具的一种较为理想的方法^[4].

本文提出了一种新型的机器人手腕机构和基于 STL 模型分层数据的运动控制技术,在此基础上研制了基于金属电弧喷涂和电刷镀技术的快速制模工业机器人.此外,还介绍了利用该机器人系统快速制造汽车覆盖件喷涂模具的一个实例.

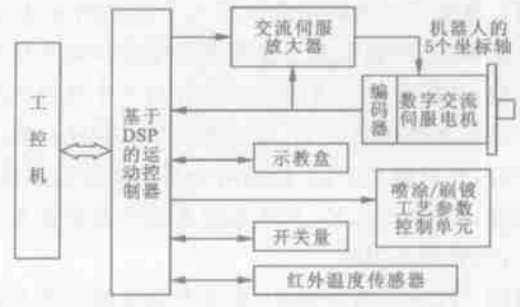
1 制模工艺与电弧喷涂制模系统的构成

金属电弧喷涂快速制模是一种复形法制模技术,它以一个实物模型(或称为原型)作为母模,以电弧为热源,通过高速气流将熔融状态的金属材料雾化,并使其喷射、沉积在母模表面上,形成一定厚度的致密金属涂层.涂层拷贝了原型的形状,获得了所需的模具型腔,在完成补强、脱模、抛光等后处理工艺后,即可完成模具的快速制造.母模可以是快速原型或过渡模型,以及产品实物或通过高速数控加工得到的木材、石膏等非金属材料.电刷镀技术作为一种可选的后处理工艺,可以在模具工作表面刷镀强化涂层^[5].

金属电弧喷涂快速制模工艺需要控制 2 类参数:对运动参数的控制,主要是对电弧喷枪(或镀笔)的位姿和轨迹控制;对电弧喷涂(或电刷镀)工艺参数的控制,即对非运动量的控制.电弧喷涂工艺参数主要包括:喷涂电压、电流、空气压力、喷涂距离和喷枪运动速度等.电刷镀工艺参数包括:刷镀电流、电刷镀笔的相对运动速度和刷镀液的流速等.这 2 种工艺的运动量和非运动量参数都需要通过实验来实现参数优化.

金属电弧喷涂快速制模系统的构成如图 1 所示,机器人机械本体为 5 自由度直角坐标型结构,定位机构采用龙门式结构,用于实现喷枪或镀笔的空间定位.由于在机器人的手腕上采用了一个特别设计的连杆机构,因此在机构上避免了姿态调节与空间定位的运动耦合.温度传感器为实时控制喷涂区

温度提供了涂层温度信息,控制系统采用工业 PC 机加运动控制卡的开放式数控结构模式,运动控制器主芯片采用 DSP(Digital Signal Processor),控制系统为主从式控制结构,工控机负责人机交互接口的管理、分层数据处理和控制系统的实时监控等工作.由下位机运动控制器来完成控制(运动量和非运动量)的所有细节,这样工控机与运动控制器上的 DSP 就共同构成了双 CPU 控制系统的硬件结构.



(a) 金属电弧喷涂制模系统的构成



(b) 机器人执行喷涂作业

图 1 电弧喷涂和电刷镀技术的快速制模系统

2 关键技术

2.1 机器人的手腕机构

典型结构的机器人手腕有 2 类:由液压马达直接驱动构成;由齿轮传动构成.对于齿轮传动类型,又有球面齿轮、直齿轮和锥齿轮等.目前,使用较多的是 3 自由度手腕,它大多采用多轴差动轮系构成.由于各种手腕机构与机器人的位置机构存在着非线性运动耦合,即在进行手部姿态调节时,将改变机器人手部的空间位置,因此位置控制算法相对比较复杂,必须在控制算法中加以补偿.

金属电弧喷涂机器人采用了一种新型的、与位置机构运动解耦的姿态调节机构,其示意图如图 2 所示.姿态调节手腕由回转轴和连杆机构 $ABCE2FGD$ 构成,具有 2 个转动自由度. $ABCEFGD$ 的基本结构形式是一个由 5 个活动构件和 7 个回转运



(a) 手腕机构运动简图 (b) 轴与轴相交于 P 点 (c) 轴与轴共面

A、B、C、D、E、F、G: 连杆机构; P: 锥顶点; θ : 锥顶角; φ : 轴转角

图 2 金属电弧喷涂机器人姿态调节手腕机构

动副构成的连杆机构,其中由 ABCD 构成第 1 个平行四边形,由 CEF G 构成第 2 个平行四边形.图中所示的末端执行器是电弧喷枪,根据末端执行器的需要,可以增加绕其轴线(平行于 EF 杆)的回转自由度,从而构成 3 自由度手腕.

姿态调节机构工作原理如下:轴为 AD 杆,

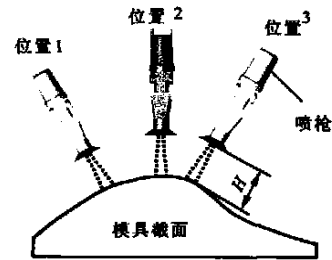
轴为 EF 杆,轴轴线与轴轴线相交于 P 点,P 点就是机器人手部末端执行器的工作点位置,连杆机构一旦设计完成,则 P 点相对于手腕的空间位置就完全确定了,且 AP 与 BE 的长度相等.对于喷枪,P 点就是模具表面上的喷涂焦点,对于刷镀笔,P 点就是与模具表面接触的刷镀笔的中心点.由图 2 可知,AB 杆转动将带动喷枪(或刷镀笔)作绕 P 点的转动.轴转动与 AB 杆摆动共同作用,将驱使电弧喷枪作圆锥运动,以喷枪轴线为母线,改变与的大小,就可以调节喷枪的姿态,理论上喷枪轴线可以位于过 P 点的任意方向.在改变喷枪姿态的时候,由机器人位置机构确定的喷涂工作点 P 的空间位置将始终保持不变,从而在机构上实现了位置机构与姿态调节机构的运动解耦,解决了传统的姿态调节机构与位置机构存在的非线性运动耦合问题,因此可以极大地简化机器人的运动分析和控制算法.

通过增加虚约束,可以克服平行四边形机构在原动件与机架共线时存在的运动不确定性问题,如采用双平行四边形机构或者齿轮机构等.

2.2 基于 STL 模型分层数据的运动控制策略

2.2.1 喷涂制模工艺对喷枪运动的要求 如图 3 所示,在金属电弧喷涂制模过程中,喷枪相对于母模表面运动所具有的特点为:喷涂距离 H 是一个非常重要的工艺参数,同时又是机器人的一个运动参

数,喷枪与模具型面之间需要始终保持一个适当的法向距离,因此 H 需要通过实验来确定和优化,可以通过调整喷枪在 EF 杆上的位置来实现(见图 2a);喷枪应动态地与喷涂表面保持垂直姿态,目的是为了提高金属的沉积效率并保证金属涂层组织的致密、均匀性,从而使涂层具有较好的机械性能,实际喷涂过程中要求喷枪的法矢偏差角度不大于 $\pm 15^\circ$;模具表面的微小特征可以忽略.当电弧喷涂时,金属喷射流呈一定的发散角喷出,当喷枪与模具表面间的 $H = 120 \sim 200 \text{ mm}$ 时,在母模表面形成直径为 $40 \sim 100 \text{ mm}$ 的圆形喷涂区.因此,对于喷



(a) 喷涂工艺对喷枪位姿的要求



(b) 喷涂作业实例

图 3 电弧喷涂工艺过程

涂工艺,在生成喷枪最终运动路径以前,可以对模具型面数据或喷枪运动路径数据进行平滑处理^[4]。由于刷镀笔与电弧喷枪的工作点具有完全相同的运动轨迹,不同之处仅在于刷镀笔与母模表面之间需要保持接触,即刷镀笔的 $H = 0$, 因此这 2 种工艺控制方法完全相同。

2.2.2 STL 模型的分层全息数据 STL 文件格式是对三维实体模型表面的一种近似表达方法,它采用所谓面型化的处理方法对实体曲面进行近似处理,即用一系列空间小三角面片来表示三维实体模型的表面,每一个小三角面片用三角形的 3 个顶点



图 4 STL 模型分层处理后自动生成的机器人运动控制数据

由于传统的快速成形系统对 STL 模型分层处理后所得到的层轮廓数据是一系列首尾相接的平面直线段,但是金属电弧喷涂工艺要求喷枪在工作中与模具表面保持垂直,因此电弧喷涂快速制模系统所使用的分层数据必须包含每一直线段的法向量,即把标准 STL 模型经分层处理后所获得的包含法矢的层轮廓数据称为“分层全息数据”。

2.2.3 喷涂轨迹文件的自动生成与喷枪的运动控制 分层全息数据给出了喷涂机器人末端执行器 - 电弧喷枪在作业过程中的所有位姿(见图 5a),末端 P (见图 2)的轨迹由一系列首尾相接的平面直线段构成。在分层全息数据文件中,法向量是用半径为 1 的单位球面上的一个点来表示,法向量的另一个点默认为模型所在坐标系的原点,方向由原点指向外侧。

由于喷涂机器人在机构上避免了姿态调整与空间定位的运动耦合关系,所以其运动控制算法非常简便。在用于电弧喷枪位姿控制的 5 个坐标 $(x, y, z, \theta, \varphi)$ 中,其中位置坐标与分层全息数据文件中节点的三维坐标是一一对应的,可通过坐标的平移运算求得。如果在分层处理前,将模具 CAD 模型的参考坐标系设为机器人的工作坐标系,则分层处理得到的三维坐标就无需平移,可直接用于喷枪位置的控制。姿态调整并不影响机器人的空间定位,其坐标需要根据线段上的法向量通过计算求得。设机器人手腕上 2 根轴的运动范围分别为 $\theta = [0 \sim 360^\circ]$, $\varphi = [0 \sim 90^\circ]$,如图 5b 所示,则喷枪姿态的坐标计算式如下所述。

当 $nz_i > 0, ny_i > 0$ 时

$$\theta = (180/\pi) \arccos(nx_i/\sin \varphi) \quad (1)$$

坐标及三角面片的法向向量来描述。

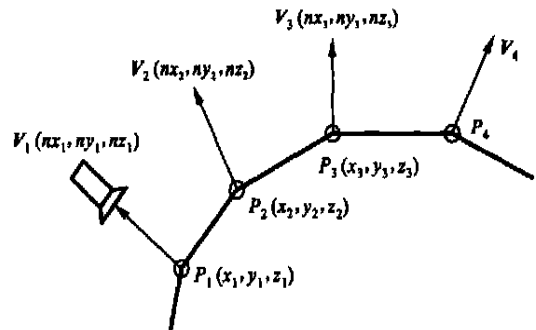
根据电弧喷涂工艺和喷枪运动的特点,将喷枪运动路径确定为平面曲线,因此喷涂机器人的运动控制数据可以通过平面与模具型面的求交运算来获得。直接对模具的 CAD 模型进行求交运算可以获得精确的喷枪运动轨迹,但计算复杂,对于喷涂工艺,这不仅没有实质性意义,而且模具表面的微小细节还可能不利于喷枪的平稳运动。因此,选择将模具的 CAD 模型首先转换为 STL 模型,然后再进行平面求交运算,可使问题得到简化。图 4 给出了 STL 模型获取机器人控制数据的流程。

$$\theta = (180/\pi) \arccos(nz_i) \quad (2)$$

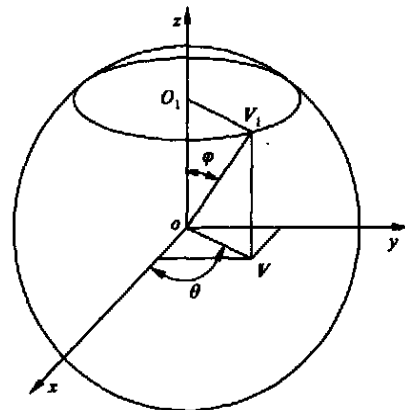
当 $nz_i > 0, ny_i < 0$ 时

$$\theta = 360 - (180/\pi) \arccos(nx_i/\sin \varphi) \quad (3)$$

$$\theta = (180/\pi) \arccos(nz_i) \quad (4)$$



(a) STL 模型的分层数据



(b) 机器人位姿坐标的计算

$V_i (i = 1, 2, 3, 4)$: 喷枪在直线段上的姿态; $x_i, y_i, z_i, P_i (i = 1, 2, 3, 4)$: 喷涂点的位置; O_1 : 投影点

图 5 电弧喷枪位姿坐标的计算

当法向量在 (nx_i, ny_i, nz_i) 中存在 0 坐标值时,逆向求解会出现奇异与退化现象,此时需要综合考虑 3 个坐标分量的情况.在得到喷枪的位置与姿态坐标后,按照 (x, y, z, \quad) 坐标的顺序逐点进行排序,即可自动生成喷涂轨迹文件.由于喷枪路径为平面曲线,因此进行 5 轴 4 联动插补运算,即可控制喷枪按照要求来完成喷涂作业.

3 汽车覆盖件模具制作实例

图 6 给出了某汽车发动机盖板拉伸模的制作实例,制作比例为 1:1.首先,根据模具的三维 CAD 数据通过高速数控加工制作出模具的石膏原型,然后进行喷涂前的预处理,即烘干、打磨、抛光及刷脱模剂等.经过预处理的石膏原型被送到喷涂机器人的工作平台上,进行金属电弧喷涂,喷涂结束后,再进行补强、脱模、抛光等后处理工艺.根据需要,还可

以对喷涂模具表面刷镀强化涂层,从而完成发动机盖板喷涂模具的制作.模具的制作耗时约 3 个星期,成本为 115 万元左右.如果按照传统方法制作该零件的钢模具,则需要约 3 个月时间和约 25 万元的费用.经试制检验,合格覆盖件模具的三维模型数据可以直接用于数控加工最终的钢模具,因此保证了钢模具制作一次成功,避免了在钢模具制作上的反复,进而缩短了新车型的开发周期,降低了开发成本.

4 结 论

本文提出的与位置机构运动解耦的手腕机构,以及基于 STL 模型分层全息数据的运动控制方法,在金属电弧喷涂机器人中都得到了成功的应用.本文研究的机器人的运动分析简便,控制算法简单,无需人工编程,喷涂轨迹可自动生成,进一步提高了工作效率.该机器人的制模系统实现了金属电弧喷涂和电刷镀制造工艺的集成,可以对电刷镀和电弧喷涂过程的工艺参数实现控制,从而实现了 2 种工艺的高效、自动化作业,为金属电弧喷涂模具的制造质量提供了保证.

案例研究表明,金属电弧喷涂制模机器人可以实现大型汽车覆盖件模具的自动、快速制造,且成本低、周期短.经试制检验,合格覆盖件模具的三维模型数据还可以用来加工钢模具,因此避免了在钢模具制作上的反复,可保证钢模具一次加工成功,从而缩短了新车型的开发周期,降低了开发成本.

参考文献:

- [1] Takeo Nakagawa. Advances in prototype and low volume sheet forming and tooling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2): 244 - 250.
- [2] Margaret B V S. Rapid tooling another better idea from ford [J]. Forming and Fabricating, 2002, 9(5): 29 - 34.
- [3] Cheah C M, Chua C K, Lee C W, et al. Rapid sheet metal manufacturing, part 1: indirect rapid tooling [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2002 (19): 411 - 417.
- [4] 朱东波. 基于 RP 技术的板料成形模具快速制造系统研究 [D]. 西安:西安交通大学机械工程学院, 2001.
- [5] 何仲赞,朱东波,唐一平,等. 基于电弧喷涂和电刷镀的快速制模技术 [J]. 模具工业, 2003 (12): 43 - 47.

(编辑 管咏梅)

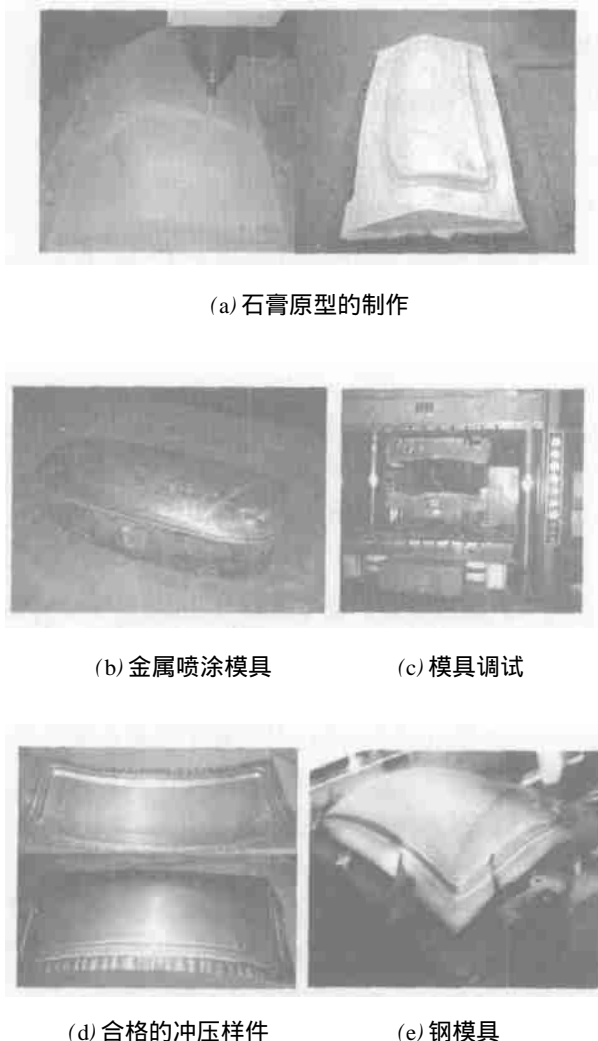


图 6 汽车发动机盖板模金属喷涂模具及钢模具制作