

坐标式焊接机器人焊枪悬臂运动分析

刘俊¹ 林砺宗² 闵丽军¹ 胡新隆¹

1. 上海电机技术高等专科学校 机械系, 上海 200240; 2. 华东理工大学机电中心, 上海 200093

摘要: 文章从分析坐标式焊接机器人焊枪悬臂运动过程中的振动出发, 介绍了模态分析基本理论。在 ADAMS 中引入 ANSYS 生成的模态中性文件 and SolidWorks 建立的装配体, 构建了机械系统分析模型, 对模型进行仿真运算, 仿真结果验证了坐标式焊接机器人方案的可行性。

关键词: 焊接机器人; 焊枪悬臂; 模态分析; 仿真; 运动分析

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2265(2004)06-0072-03

The kinetic analysis of cartesian co-ordinates welding robot's cantilever torch

LIU Jun LIN Lizong MIN Lijun HU Xinlong

Abstract: On the base of the theory of mode analysis, the kinetic analysis of Cartesian co-ordinates welding robot's cantilever torch is carried out. The 3D model of the robot is built on SOLIDWORKS, and then is transferred to ANSYS, here a modal analysis is completed and the modal data is input to ADAMS. Finally, a dynamic analysis of total system is simulated. The result verifies the scheme of the Cartesian co-ordinates welding robot's.

Key words: welding robot; cantilever torch; mode analysis; simulation; kinetic analysis

1 引言

上海某公司容器车间每年都有上百台换热器的生产任务。其中管子与管板的接头焊接工作量相当大, 一台换热器少则几十个管头、多则 6000 多个管头。管径小(通常为 20mm 左右)、排列间距也小, 操作难度大。而换热器接头因长期承受压差对管子产生的负荷及使用过程中多次反复加热和冷却、腐蚀介质的侵蚀, 对接头质量要求高。目前容器车间管头和管板的焊接主要以手工半自动氩弧焊接为主, 不仅焊接人员辛苦, 而且焊缝成形不美观, 接头质量也很难保证。为了改变这种生产状况, 上海某公司提出将已有设备改造成能自动定位、焊接的弧焊机器人。我们经调查研究, 确定了坐标式示教机器人方案(图 1), 并对该机器人的步进电机数控系统进行了精度分析, 分析结果表明, 控制系统误差在误差允许范围内^[1]。但一旦机器人运行起来, 还有一个问题必须考虑: 运动过程中的振动问题。考查整个机器人系统, 可能造成最大振动的部分是焊枪悬臂部分。导致焊枪悬臂振动的原因主要是: 焊枪是由步进电机带动沿导轨作横向移动的, 焊枪启动和停止的过程是加减速的过程, 这两个过程都将造成焊枪悬臂的振动, 这个振动的振幅有多大? 需要多长时间达到稳定状态? 是我们考虑机器人系统方案可行性的一个重要因素。

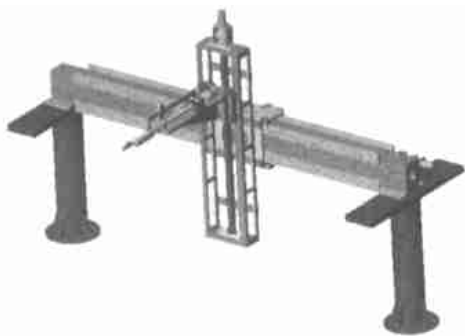


图 1 弧焊机器人模型图

性, 把结构的质量分布、刚度分布和阻尼分布分别用质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵表示出来, 这样便有了足够多的信息来确定系统的模态参数(固有频率、阻尼系数、模态振型)。

(2) 实验法 从测量结构(样机)上某些点的动态输入力和输出响应开始, 一般还要将测得的数据转换成频响函数, 即作为频率函数的输入输出之比。

大多数情况下, 我们研究的系统不能视为单自由度系统, 因为它们都是由无穷多个质量、刚度和阻尼构成的连续组合体。多自由度系统的传递函数写成矩阵形式是:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

其中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{x(t)\}$ 、 $\{f(t)\}$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、力向量和响应向量。

将时间域矩阵方程变换到拉氏域(变量为 P), 假定初始速度和初始位移为零, 则得:

$$(p^2[M] + p[C] + [K])\{X(p)\} = \{F(p)\} \quad (2)$$

$$\text{或者写为: } [Z(p)]\{X(p)\} = \{F(p)\} \quad (3)$$

其中 $[Z(p)]$: 动刚度矩阵。

传递函数矩阵 $[H(p)]$ 的定义: $\{X(p)\} = [H(p)]\{F(p)\}$ (4)

按照标准算法, 一个矩阵的逆矩阵可以由它的伴随矩阵计算出来:

$$[H(p)] = [Z(p)]^{-1} = \frac{\text{adj}([Z(p)])}{|Z(p)|} \quad (5)$$

式(5)的分母, 叫做系统特征方程。系统特征方程的根, 即系统极点, 决定系统的共振频率。如果力函数等于零, 对于 N 自由度系统, 有 $2N$ 个呈复共轭对出现的特征根:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \lambda_N & & \\ & & & \lambda_1^* & \\ & & 0 & & \ddots \\ & & & & & \lambda_N^* \end{bmatrix}$$

2 模态分析基本理论

研究一个系统的振动特性, 基本上有两种途径:

(1) 解析法 先要知道结构的几何形状、边界条件和材料特

$$= \begin{bmatrix} \sigma_1 + j\omega_1 & & & & 0 \\ & \dots & & & \\ & & \sigma_N + j\omega_N & & \\ & & & \sigma_1 - j\omega_1 & \\ 0 & & & & \dots \\ & & & & & \sigma_N - j\omega_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

极点的实部 σ_r 是阻尼因子, 虚部 ω_r 是阻尼固有频率。

特征值对应着一组特征向量, 这些特征向量可以引出模态振型向量(也叫模态位移、模态向量) $\{\psi\}_r$ 的概念(7)。

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \{\psi\}_1 & \dots & \lambda_N \{\psi\}_N & \lambda_1^* \{\psi\}_1^* & \dots & \lambda_N^* \{\psi\}_N^* \\ \{\psi\}_1 & \dots & \{\psi\}_N & \{\psi\}_1^* & \dots & \{\psi\}_N^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[V] = [\{\psi\}_1 \dots \{\psi\}_N \{\psi\}_1^* \dots \{\psi\}_N^*] \quad (8)$$

矩阵 $[V]$ 与响应或位移有关, 叫做模态向量矩阵。

目前, 可进行模态分析的有限元分析软件主要有: MSC/NASTRAN、ANSYS、ABAQUS、I-DEAS 等。本文首先在 ANSYS 中建立关键部件的有限元模型, 形成模态中性文件, 然后在 ADAMS 中调用模态中性文件, 使柔性体与刚性体有机结合成一体, 再进行仿真处理。

3 焊枪悬臂运动分析

3.1 柔性体模态中性文件的生成

在 ADAMS 建立的模型, 其构件一般都是属于刚体, 在 ADAMS 中作运动分析时不会发生弹性变形。而实际上, 在较大载荷的情况下, 机构受力后会有较大的变形和位移变化, 以弹性体代换刚体, 可以更真实地模拟出机构动作时的动态行为。ANSYS 进行模态分析的同时, 可生成供 ADAMS 使用的柔性体模态中性文件(即 .mnf 文件)。然后利用 ADAMS 中的 ADAMS/Flex 模块将此文件调入 ADAMS 以生成模型中的柔性体, 利用模态叠加法计算其在动力学仿真过程中的变形及连接节点上的受力情况。这样在机械系统的动力学模型中就可以考虑零部件的弹性特性, 从而提高系统仿真的精度。

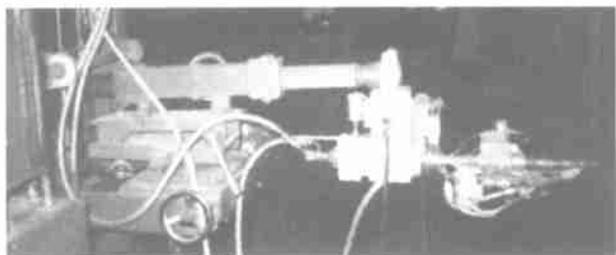


图2 焊枪悬臂

3.2 三维建模

ADAMS 虽然功能强大, 但造型功能相对薄弱, 难以用它创建

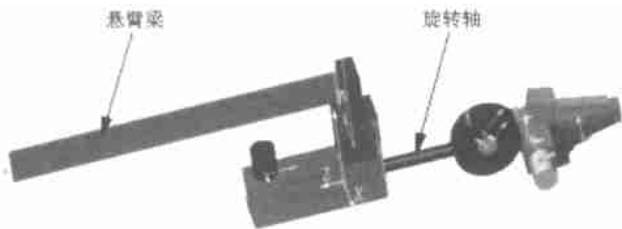


图3 焊枪运动仿真分析三维模型

具有复杂特性的零件, 但 ADAMS 支持现在通用的几种图形标准 IGES、STEP 和 Parasolid 等等, 通过 ADAMS/Exchange 模块可以输入其它 CAD 软件生成的模型文件。参考实物(图 2), 依据等效分析及可靠原理, 用 SolidWorks 建立图 3 所示的装配体。

3.3 在 ADAMS 中引入模态中性文件

ADAMS 可以使用任何有限元模型作为 ADAMS/Flex 中的柔性体, 如 MSC/NASTRAN、ANSYS、ABAQUS、I-DEAS 等有限元分析软件生成的模型。ANSYS 可以直接生成 MNF(模态中性文件), 而不会产生中间数据文件。在 ADAMS 中导入模态中性文件以后, ADAMS/Flex 会计算它的模态阶数, 并显示在柔性体修改对话框中。悬臂梁的有效频率为 222.4127722507 到 9465.9142950728, 有效模态数共为 11 个; 旋转轴的有效频率为 222.4127722503 到 2442.077124562, 有效模态数也是 11 个。在该对话框中, 我们可以找到与任意频率值最接近的模态, 并使用动画播放工具可以观察某一阶模态的振型(图 4)。



图4 旋转轴在频率 $f = 525.1316640348$ 时的振型

3.4 建立机械系统模型

把 SolidWorks 建立的装配体文件导入 ADAMS, 并根据实际情况, 给各个零件加上适当的约束。导入悬臂梁和旋转轴的模态中性文件, 调整柔性体到准确位置, 施加柔性体与刚性体之间的约束。

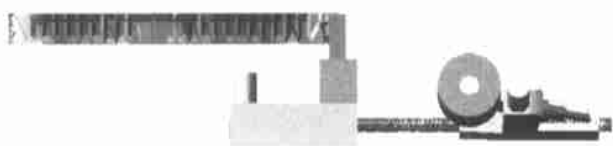


图5 引入柔性体的焊枪仿真运行图

3.5 仿真运算

对建模进行仿真运算。图 5 为引入柔性体的焊枪仿真运行过程中的一个状态图。柔性件不同颜色变化反应柔性件变形大小。

将柔性体引入 ADAMS/View 后, 可以对它的某些内容重新设置, 以提高仿真效率。设置的内容包括模态成分、阻尼率、惯性组成以及初始条件等。

3.6 仿真结果分析

在前面的仿真运行顺利的情况下, 着手进行焊枪起、停阶段的焊枪端部的运动分析。焊接的相邻两孔之间的距离定为 20mm, 焊枪从一个孔移动到另一个孔定为 1.5 秒, 起、停阶段各为 0.5 秒, 中间匀速运行阶段为 0.5 秒, 则焊枪匀速运行速度为 20mm/s。

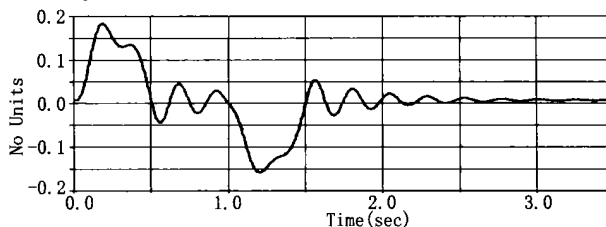


图6 焊枪端部横向振动曲线

(下转第 75 页)

$$\frac{\alpha^2 + 1 + (\alpha + 1)\zeta + \frac{2}{3}\zeta^2}{(\alpha - 1)^2 + \frac{1}{3}\zeta^2} \lg \Phi \cdot \xi \cdot \Phi \cdot \alpha +$$

$$\frac{\alpha \cdot \beta}{2} \left[\frac{\alpha + \zeta + 1}{(\alpha - 1)^2 + \frac{1}{3}\zeta^2} \xi \cdot \Phi \right]^2 \alpha$$

其中:

$$\alpha = \frac{b}{a}, \beta = \frac{L}{a}, \zeta = \frac{1}{a}, \xi = \frac{F_y}{K_x \cdot a}, \Phi = \frac{\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi}{\cos \varphi - \mu \cdot \sin \varphi}$$

上面等式中第一部分表示测量头平移产生的误差,第二部分则表示测量头倾斜产生的误差。当倾斜角 φ 相当大时,测量误差主要由平移产生。

为了保证测量误差 $\delta < 0.1 \mu\text{m}$, 当最大倾斜角 $\varphi_{\max} = 60^\circ$, 摩擦系数 $\mu = 0.3$, 气压夹头在径向方向的刚度 $k_x = 0.15 \text{ N}/\mu\text{m}$ 时, 其测量力 F_y 可计算如下:

$$F_y = k_x \cdot e_{xy} = k_x \cdot \xi \cdot \alpha$$

$$< \frac{(\alpha - 1)^2 + \frac{1}{3}\zeta^2}{\alpha^2 + 1 + (\alpha + 1)\zeta + \frac{2}{3}\zeta^2} \cdot \frac{k_x \cdot \delta}{\lg \Phi \cdot \xi \cdot \Phi} \approx 6.37 \times 10^{-4} \text{ N}$$

本设计中 $\alpha = 28.2 \text{ mm}/8.5 \text{ mm} = 3.32$, $\beta = 49.5 \text{ mm}/8.5 \text{ mm} = 5.82$, $\zeta = 14.3 \text{ mm}/8.5 \text{ mm} = 1.68$ 。实际测量中, 测量力通过气压滑动夹头能够控制在 $0 \sim 0.005 \text{ N}$ 变化, 因此, 在上述条件下能够确保测量误差 $\delta < 0.1 \mu\text{m}$ 。

4 测量仪的性能验证

为了验证本设计的测量传感器的性能, 可通过重复性试验来评估。对标准的球形基准面在四个方向 ($X+$, $X-$, $Y+$, $Y-$), 每个方向都进行三次成形测量, 被测数据与平均数据曲线的离散程度可通过标准方差 σ 来判断。本测量仪在测量力为 $0.001 \sim 0.0015 \text{ N}$ 和测量速度为 $50 \sim 100 \text{ mm}/\text{min}$ 时, 其测量数据的重复性在所有方向均达到 $3\sigma < 0.1 \mu\text{m}$, 表明本设计所使用的激光干涉传感器的测量精度能达到 $\pm 0.1 \mu\text{m}$, 对在线成形测量具有足够高的精度。

5 结论

(上接第 73 页)

为了能清晰地观察到焊枪端点的振动情况, 我们在端点位置设置一个刚性小球, 给小球施加同样的运动参数, 将小球的运动轨迹减去焊枪端点的运动轨迹, 得到图 6, 这就是焊枪从静止加速到 $20 \text{ mm}/\text{s}$, 匀速运行 1 秒后, 再减速到 $0 \text{ mm}/\text{s}$ 这一过程的振动曲线。从图中我们可以看到: 曲线符合总的运动规律, 有明显振动。2.0 秒以后 (即速度降为零后 0.5 秒), 开始趋于稳定, 振幅不超过 0.03 mm , 可以开始焊接, 不影响定位精度。

根据以上分析可以得出以下结论: 焊枪在起、停阶段由于加、减速的确造成焊枪头部有一定的振动, 但稳定时间不超过 0.5 秒。所以, 焊接机器人总体方案从振动角度考虑, 也是可行的。

4 结束语

本文从模态分析基本理论出发, 在 ADAMS 中引入 ANSYS 生成的模态中性文件, 构建了机械系统分析模型, 对模型进行仿真运算, 得到了焊枪悬臂端点的振动曲线, 由曲线可以观察到焊

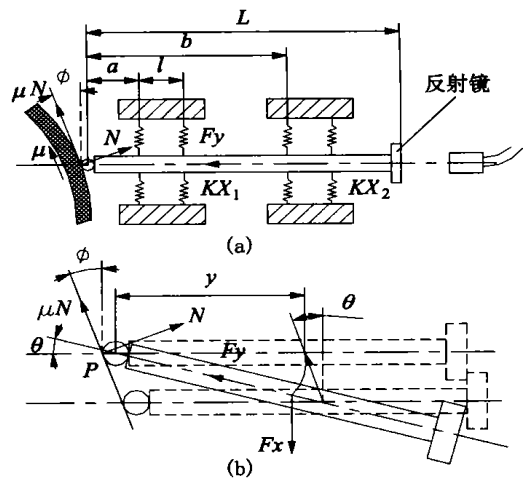


图 3 测量时测量头的力学分析

设计研制的用于成形表面在线测量的新型超精度测量仪, 具有如下主要特点:

- 1) 体积小 (大约 $130 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$), 易于安装在加工机床上;
- 2) 采用专用气压夹头, 测量力可在 $0 \sim 0.005 \text{ N}$ 范围内精确控制, 因此具有高的测量精度;
- 3) 采用激光干涉位移传感器, 通过线性可变微分变换器进行比较, 具有很好的重复性 ($\pm 3\sigma < 0.1 \mu\text{m}$) 和高相关性;
- 4) 由于采用实时在线测量, 具有高的测量效率。

[参考文献]

- [1] 哈尔滨工业大学. 误差理论与数据处理. 北京: 机械工业出版社, 1980
- [2] 吴训一. 自动检测技术. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [3] 比斯利. 激光及其应用. 曹秋生译. 北京: 国防工业出版社, 1976

收稿日期: 2003-12-29

作者简介: 欧阳八生 (1963-), 男, 湖南衡阳人, 南华大学机械工程学院讲师。

(编辑 李秀敏)

枪悬臂端点的振动情况, 经分析焊枪振动在系统要求范围内, 从而验证了坐标式焊接机器人方案的可行性。

[参考文献]

- [1] 刘俊, 黄志明. 弧焊机器人系统设计与数控系统误差分析. 上海电机技术高等专科学校学报, 2003(1)
- [2] 沃德-海伦, 斯蒂芬-拉门兹, 波尔-萨斯 翻译, 白化同, 郭继忠. 模态分析理论与试验. 北京: 北京理工大学出版社, 2002
- [3] 任重. ANSYS 实用分析教程. 北京: 北京大学出版社, 2003
- [4] ADAMS/SOLVER User's Manual, MDI Inc., 2000
- [5] ADAMS/FLEX User's Manual, MDI Inc., 2000

收稿日期: 2003-10-13

作者简介: 刘俊 (1971-), 女, 江西宜春人, 上海电机技术高等专科学校讲师, 华东理工大学在读硕士研究生。

(编辑 李秀敏)