

碳纤维复合材料机械臂设计*

陈 丰

(郑州工学院数力系)

摘 要: 碳纤维复合材料是新型的结构材料,它的力学性能可通过设计进行控制改变。本文采用结构有限元分析的方法,对复合材料机械臂进行了力学分析计算,获得了满足设计要求的结构。

关键词: 碳纤维复合材料,机械臂,力学分析

中图分类号: TP241:TQ342·742

碳纤维复合材料作为新型的结构材料,隔热材料和阻尼减震材料,已广泛地应用于航空航天工业中。国外一些新型工业机器人的手臂和底座也多有采用。碳纤维复合材料的优点是重量轻,比强度好,比刚度大。它与常规金属材料最显著的不同在于它的力学性能可通过设计进行控制改变,因此,它在力学性能方面给设计人员提供了自由度。我们正是利用碳纤维复合材料的这一特性,采用结构有限元分析的方法,对复合材料机械臂进行了力学分析计算,获得了满足设计要求的结构,并在该计算结果的基础上,用碳纤维复合材料加工制造机械臂。最后对机械臂进行了性能测试。

1 碳纤维复合材料机械臂

由于空间机器人的工作环境和性质要求该机器人质量轻、刚度好、振动小、稳态时间短和精度高。为了满足这些要求,可采用几种方法,如:可调的弹性—质量—阻尼系统;机器人力函数的开环控制;粘弹性涂料在机器人结构件上的应用和用复合材料进行机器人的制造。

用复合材料进行机器人的制造这一方法,提出了利用纤维状高分子材料制造机器人的机械臂,而不是用常规的金属材料。

对于给定的机器人运动(具有一定的载荷,在一定的速度下),末端操作器的弹性动力学响应、机械精度、重复性、末端操作器的稳态时间等特性都受到结构部件的质量、刚度、阻尼特性的影响。由一般的力学性质可知,减少质量将降低惯量,提高操作速度;增加刚度将降低挠度;增加材料的阻尼将减少稳态时间。这些特性的改进有利于提高控制精度。这些性质表明要通过设计,合理地选择机械臂的材料特性和几何尺寸,通过适当选择这些变量,我们可以设计出满足所要求的机器人装置。

复合材料不象常规的金属材料,对于金属材料,一旦选择了某种材料,就给定了强

* 收稿日期:1992-01-02

度、密度和阻尼特性。而纤维状的复合层制品有更多的设计灵活性。必须对它进行细心的选择,以合成具有所期望的物理特性的材料,这些物理特性依赖于纤维的类型、基体的类型、层制品中每一层片的纤维倾角、纤维的含量和层片的叠放顺序等。

我们设计的机械臂是矩形空箱截面结构。臂壁厚为 H , 由 N 层纤维组成。

机器人在运动时,机械臂的上下板面和两个侧面的纤维将受到不同程度的拉力、压力和剪切力。对于单向纤维的试样,沿着纤维方向将有最大的拉伸强度,但其阻尼是最低的。在偏离纤维轴的方向上,拉伸强度将降低,但阻尼值将增高,当纤维接近 45° 方向时,剪切强度将是最好的。由于机器人在运动时,各个板面受力状态的复杂性,我们取几种特定的纤维倾角 0° 、 45° 和 90° 作为我们的选择,以简化工艺加工过程。

2 数值计算结果及分析

为了对机械臂结构进行数值分析计算,我们首先对结构进行了如下简化:

- ①小臂内的电机支座很刚硬,即与机座相连接的点为固定点;
- ②将各关节轴(及轴上的零部件)简化成刚性的均布质量的等截面梁;
- ③机械臂抓取的载荷为集中质量;
- ④电机组件为刚性桁架结构,视质量为质心处的集中质量;
- ⑤大小臂安装轴承处,刚度很大,用加厚的压板代替,

对于以上所简化的结构,我们采用四边形板壳元、三角形板壳元、梁单元、杆单元和三维弹簧元对其进行有限元离散化,共取节点 634 个。应用 EDASS 程序,在 386 微机上对机械臂在一定载荷作用下,纤维层压板的不同铺设情况,进行了挠性变形和强度计算。

对于一般的层压板,我们有:

$$\{N\} = [A \ B] \{\varepsilon^\circ\}$$

$$\{M\} = [B \ D] \{K\}$$

其中: N ——薄膜力(kg/mm)

M ——弯矩($\text{kg} \cdot \text{mm}^2$)

A ——平面应力刚度矩阵(3×3)

B ——耦合矩阵(3×3)

D ——弯曲刚度矩阵(3×3)

ε° ——面内应变

K ——曲度

对于对称的层压板, $[B]=0$,这时:

$$\{N\} = [A] \{\varepsilon^\circ\}$$

$$\{M\} = [D] \{K\}$$

为了简化计算,我们选用对称的层压板结构。即层压板有一中间层,中间层的上下层应具有相同的纤维倾角。

由上可知,在一定载荷作用下,要想减小变形,应增大平面应力刚度矩阵 $[A]$ 和弯曲刚度矩阵 $[D]$ 的值。

下面我们对三种层压板厚度进行了计算。

第一种, 板的厚度为 1.375mm, 由 11 层组成, 铺层方式为 5 种:

① $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$

② $0^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 0^\circ$

③ $0^\circ / 90^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ$

④ $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$

⑤ $0^\circ / -45^\circ / +45^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 0^\circ$

通过数值计算, 可获得不同铺层方式的材料力学性能参数, 见表 1。由表 1 的数据可清楚地看出, 不同的铺层方式对刚度矩阵系数的影响是比较大的。

表 1 铺层方式对刚度矩阵系数的影响

铺层方式 刚度系数	1	2	3	4	5
A11	1.48×10^4	1.06×10^4	1.34×10^4	1.06×10^4	9.15×10^3
A22	1.76×10^4	1.89×10^4	1.61×10^4	1.89×10^4	1.74×10^4
A12	2.22×10^2	2.93×10^3	2.93×10^3	2.93×10^3	5.63×10^3
A66	5.43×10^2	1.99×10^3	1.99×10^3	1.99×10^3	3.43×10^3
D11	1.90×10^3	1.05×10^3	1.97×10^3	1.71×10^3	1.12×10^3
D22	3.20×10^3	3.48×10^3	2.84×10^3	3.28×10^3	3.29×10^3
D12	3.50×10	5.67×10^2	3.13×10^2	1.44×10^2	6.76×10^2
D66	8.56×10	3.69×10^2	2.34×10^2	1.44×10^2	4.28×10^2
D16	-3.18×10^{-5}	1.51×10^2	1.08×10^2	6.48×10	2.16×10^2
D26	-1.01×10^{-4}	1.51×10^2	1.08×10^2	6.48×10	2.16×10^2

不同铺层方式的机械臂在一定的载荷作用下, 产生的变形列入表 2 中。

表 2 铺层方式对变形的影响

	最大线位移(mm)		节点号		顶端线位移(mm)		最大 T-H 值	
	Z 向 3g	Y 向 2g	Z 向 3g	Y 向 2g	Z 向 3g	Y 向 2g	Z 向 3g	Y 向 2g
1	0.199	133	629	0.199	0.074			2
0.154	0.091	246	630	0.116	0.051			3
0.133	0.076	241	629	0.103	0.053	0.21	0.07	4
0.134	0.078	241	629	0.098	0.051			5
0.145	0.087	241	629	0.112	0.051			

表 2 中的 T-H 值是复合材料力学中的 Tsai-Hill 强度条件。

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_L^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_L^2} = 1$$

方程的左端项:

$$T-H = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_L^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_L^2}$$

其中: σ_L ——纤维方向的强度。

σ_T ——垂直于纤维方向的强度.

τ_L ——剪切强度.

当 $T-H$ 值等于 1 时, 应力状态达到材料破坏的临界状态, 当 $T-H$ 值大于 1 时, 应力状态将引起材料破坏.

第二种, 板的厚度为 1.125mm, 由 9 层组成, 铺层方式为 2 种:

① $0^\circ / 90^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 0^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ$

② $0^\circ / -45^\circ / +45^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / +45^\circ / -45^\circ / 0^\circ$

产生的变形列入表 3 中.

表 3 铺层方式对变形的影响

	1	2
Z 向 3g 过载最大线位移(mm)	0.23	0.19
Y 向 2g 过载最大线位移(mm)	0.15	0.12

第三种, 板的厚度为 1.875mm, 由 15 层组成铺层方式为 $0^\circ / 90^\circ$ 的正交对称铺层. 产生的变形列入表 4 中.

表 4 正交对称铺层的变形

	$0^\circ / 90^\circ$ 正交对称铺层
Z 向 3g 过载最大线位移(mm)	0.10
Y 向 2g 过载最大线位移(mm)	0.06

从以上的计算结果可以看出, 由 15 层组成的层压板, 最大位移在 0.1mm 以内, 刚度余量较大, 这必将增加结构的重量. 而 9 层组成的层压板, 最大位移已超过了 0.2mm, 刚度较弱; 因此, 我们选用由 11 层组成的层压板. 对于 11 层组成的层压板, 从表 2 中可以看出, 方式 3 的最大线位移最小, 为 0.133mm, 比正交铺层的第 1 种方式降低了 30% 的位移量. 而且其 $T-H$ 值远远小于 1, 满足强度要求. 于是我们选择方式 3 作为我们工程结构的碳纤维铺层方式.

3 碳纤维复合材料机械臂的制造

碳纤维复合材料机械臂是空间机器人的关键项目之一, 该机械臂的加工由航空航天部五二九厂承担.

空间机器人的机械臂是由大臂和小臂组成, 它们分别是一个截面为矩形的封闭腔体, 上板面开有两个便于安装的方孔, 底板面和侧板面都有轴承孔, 所要求的加工精度都很高. 为保证其精度要求, 经过多次试验、比较, 我们选择了内加压法的成型方案. 在零件的外形贴模, 在零件的内腔内做一个气囊, 在气囊内充气加压, 这种方案制造出的零件, 表面光滑, 形状规整, 成形模具可以反复使用.

为保证机械臂的机械性能, 我们选用高模量碳纤维 M40 (日本东丽公司生产) 作为增强材料, 其拉伸强度为 2746MPa, 拉伸模量为 3920MPa, 伸长率为 0.7%, 比重为 $1.81\text{g}/\text{cm}^3$. 基体材料选用 648 酚醛环氧树脂. 单层板含胶量控制在 $40 \pm 3\%$, 其厚度为 0.125mm.

4 结束语

碳纤维复合材料具有优良的物理特性, 它的比强度高, 比刚度大, 力学性能可以通过设计进行控制改变。其另一特点是温度变形极微。通常的工业机器人是由钢和铝制成。一个一米长的铝结构机械臂杆件, 在室温变化 12°C 的环境里, 杆件变化 0.13mm , 这将大大影响机器人的精度。对高模量碳纤维复合材料, 如果优化设计纤维的铺层和方向, 可达到近似零热变形的设计效果, 这是普通金属材料无法做到的。

我们所设计碳纤维机械臂由长度为 220mm 的大小臂组成。制造后其力学性能和温度性能实验结果如下:

- ①在臂的端部加载 1kg , 其变形小于 $10\mu\text{m}$ 。
- ②在环境温度变化 12°C 时, 其变形小于 $10\mu\text{m}$ 。

由上述可见, 碳纤维复合材料是建造高性能机器人的理想材料之一, 目前世界各空间大国所研制的空间机器人和大型机械臂多由此种材料制成。我国对碳纤维复合材料的基本性能, 典型结构, 强度分析及成型工艺等方面亦进行了大量研制工作。但将该种材料用于制造机器人机械臂则属首次。由航空航天部五〇二所、五二九厂及郑州工学院共同研制的空间机器人的大、小机械臂选用碳纤维复合材料进行加工制造, 由于采用结构有限元优化分析计算, 其性能完全满足设计要求。该项研究于 1992 年元月 25 日通过航空航天部科技司组织的鉴定。并得到与会专家的高度评价。

参 考 文 献

- (1) 赵渠森编译·复合材料·国防工业出版社。
- (2) 陈丰, 曾凡才·简易空间机器人机械结构设计与研究报告。郑州工学院
- (3) 贺大拙·空间飞行器结构分析程序系统 EDASS 使用说明书。航空航天部五〇一部。
- (4) D.X.Liao, C.K.Sung & B.S.Thompson.

The Design of Carbon Fibre Synthetic material Mechanical Arms

Chen Feng

(Department of mathematics and mechanics)

Abstract: The carbon fibre synthetic material (CFSM) is a structural material of new type. The mechanical property of CFSM can be controlled by its structural design. In this paper, the structural finite element analysis is introduced into the mechanics analysis of CFSM mechanical arms. We have achieved satisfactory results which can meet the requirements in structure of CFSM mechanical arms.

Keywords: Carbon fibre synthetic material, Mechanical arms, Mechanics analysis.