

正交轴色谱仪设计与样机研制*

邹德金¹, 赵永杰¹, 刘 杨², 张细平¹, 袁海华²

(1. 汕头大学机械电子工程系 汕头 515063; 2. 汕头大学生物系 汕头 515063)

摘要:以正交轴色谱仪为对象,研究结构设计与样机研制。首先,根据设计要求对其进行结构设计,综合出合适的机械构型并根据动量矩定理对其进行动力学分析,得出驱动力矩;然后,对机械构型进行模态分析,得出机械构型的薄弱环节;最后,针对薄弱环节进行结构优化,在此基础上搭建物理样机,并通过相关的实验测试来分析样机的分离效率及其影响因素。结果表明:在一定范围内,随转速的增加,样机的固定相保留率增大,分离效率增高,当转速达到 800 r/min 时,固定相保留率最大,当转速超过 800 r/min 时,固定相保留率减小,分离效率降低,而当样机转速一定时,样机中液体的流速越大,固定相保留率越低。

关键词:正交轴色谱仪;结构设计;动力学分析;模态分析;样机搭建

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and development of a cross-axis chromatograph

Zou Dejin¹, Zhao Yongjie¹, Liu Yang², Zhang Xiping¹, Yuan Haihua²

(1. Department of Mechatronics Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China;

2. Department of Biology, Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: This paper presents the design and development of a cross-axis chromatograph. Firstly, the suitable mechanical structure is designed considering design requirements. The kinematics analysis is carried out to obtain the driving torque by the theorem of momentum moment. Secondly, the modal analysis is carried out in order to obtain the weak link of the structure. Finally, the structure of weak link is optimized to develop the prototype. The separation efficiency and influencing factors of the prototype are tested by experiments. The results show that, with the increase of the rotational speed in a certain range, the retention rate of stationary phase of the prototype increases, and the separation efficiency also increases. When the speed of the prototype reaches 800 r/min, the retention rate of stationary phase is the largest. The retention rate of stationary phase decreases when the speed exceeds 800 r/min, then the separation efficiency decreases. When the speed of the chromatograph keeps constant, the velocity of liquid in the chromatograph is greater and the retention rate of stationary phase is lower.

Keywords: cross-axis chromatograph; structure design; dynamic analysis; modal analysis; prototype building

0 引言

在食品、医药、轻工与生化领域,蛋白质、多肽、生物碱、黄酮和抗生素等天然产物的有效活性成分是人们进行实验研究的重要原料。这些天然产物的有效活性成分一般以低浓度形式存在于动植物与海洋生物之中,且具有数量少、价格贵及生物活性等特点,需要在保持生物活性的前提下,快速、有效地从动植物与海洋生物中分离纯

化天然产物的有效活性成分,这对提取工艺过程中所采用的分离纯化技术和分离设备具有一定的要求。现有的分离纯化技术中,高速逆流色谱技术^[1-2]具有适用范围广、操作灵活、高效、快速、制备量大、成本低廉等优点,非常适用于天然产物的有效活性成分的分离纯化,可广泛地应用于食品、医药、轻工与生化等领域。

Shinomiya K 等人^[3]和张天佑等人^[4-5]通过对正交轴色谱仪的研究,表明其运行过程中能形成三维不对称的离心力场,有利于设备中螺旋管内亲水溶剂系统的固定

相的保留,适用于天然产物的有效活性成分的分离纯化。文献[3]所研制的正交轴色谱仪含有两组分离组件,每一分离组件中包含两个分离柱,为了使得每一分离组件中的两个分离柱同向转动,采用了行星齿轮组传动,但每个行星齿轮需另增加端盖固定,这样使得整个旋转部分的转动惯量较大。张天佑教授所研制的正交轴色谱仪含有3组分离组件,每一分离组件中包含一个分离柱,为使得相邻两个分离柱之间的分离管解绕,每一个分离组件中对应设有一个解绕轴,也使得整个旋转部分的转动惯量较大。需要说明的是,目前对于正交轴色谱仪的设计还没有形成系统的设计方法。

本文研究正交轴色谱仪的设计方法,通过设计方法设计出一种转动惯量低、平衡性能良好的正交轴色谱仪的机械构型;然后,对机械构型进行模态分析,得出机械构型的薄弱环节,并进行优化;最后,建造物理样机,通过相关实验分析样机的分离效率及影响因素。

1 结构设计

1.1 设计要求

如图1所示,分离柱包含自转与公转两个旋转运动,其中自转轴与公转轴相互垂直。图中 ω_1 表示公转转速, ω_2 表示自转转速, r 表示分离柱的自转半径, R 表示分离柱的公转半径, L 表示分离柱的轴线方向的位移。通过改变 r 、 R 和 L 三者之间的关系可得到不同型号的正交轴色谱仪。

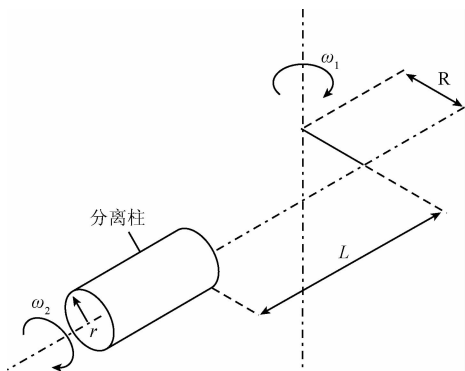


图1 分离柱的旋转运动示意图

Fig. 1 Diagram of rotary motion of separation column

正交轴色谱仪的设计要求^[1-8]有:

- 1) 公转转速与自转转速相等,即 $\omega_1 = \omega_2$;
- 2) 自转半径与公转半径的比值 $0.625 \leq \beta = r/R \leq 1.25$;
- 3) 系统动态特性良好;
- 4) 分离管解绕性良好;
- 5) 分离量/转动惯量比值高。

1.2 功能结构分解

正交轴色谱仪的功能是在高速旋转状态下,通过设备中自转离心力与公转离心力共同形成三维不对称的离心力场,实现对天然产物中的有效活性成分的快速分离纯化。正交轴色谱仪的总功能可分解成5个子功能:1)公转;2)自转;3)分离柱装配;4)分离管解绕;5)减震。功能分解图如图2所示。

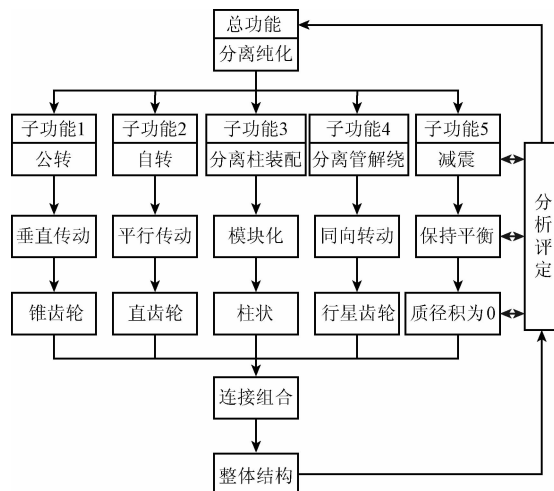


图2 功能分解

Fig. 2 Functional decomposition diagram

1.3 机构选型及系统组成

根据机构手册中现有机构所具有的功能,选择合适的机构及机构组合来实现设计要求中的需求,以获得初始的设计方案,再利用演化或变异方法对得到的设计方案进行修改和创新,寻求性能良好且能够满足设计要求的设计方案。

将图2中的子功能和各子功能的相应解法分别列为纵坐标与横坐标,构成形态学矩阵,如表1所示。

表1 形态学矩阵

Table 1 Morphological matrix

功能元	功能元解					
	1	2	3	4	5	6
A 动力机	交流电机	直流电机				
B 公转	带传动	链传动	齿轮传动			
C 自转	锥齿轮	蜗轮蜗杆	交错轴斜齿轮		行星齿轮	
	直齿轮	锥齿轮	锥齿轮	锥齿轮	蜗轮蜗杆	交错轴斜齿轮
D 分离柱	柱型	圆盘型				
E 分离管	自解绕	解绕轴	密封接头			
F 减振	弹簧	橡胶	充气式	液压式		
G 恒温	空调	水浴				

从表1的每项功能元中取出一种解进行组合,可得出的原理方案数有:

$$N = 2 \times 3 \times 6 \times 2 \times 3 \times 4 \times 2 = 1\,728 \quad (1)$$

综合传动效率、解绕性能以及制造成本3个方面的分析,可以得到以下3种较优的方案。

- 1) 方案 $S_1: A_2 + B_1 + C_1 + D_1 + E_1 + F_1 + G_1$;
- 2) 方案 $S_2: A_1 + B_2 + C_2 + D_2 + E_3 + F_2 + G_2$;
- 3) 方案 $S_3: A_2 + B_3 + C_6 + D_2 + E_2 + F_1 + G_2$ 。

1.4 方案分析评定

采用层次分析法^[9-11]对上述3种方案进行定量评价,从中选出符合设计要求的优良方案。建立所选优良方案的层次结构模型,层次结构模型是指方案中所包含的因素与方案之间的关系,如表2所示。

表2 层次结构模型

Table 2 Hierarchical Structure model

目标层 O	实现分离纯化功能		
准则层 F	传动效率 F_1	解绕性能 F_2	制造成本 F_3
方案层 S	方案 S_1	方案 S_2	方案 S_3

判断矩阵是指将层次结构模型中同一层次的要素相对于上层的某个因素,相互间作成对比而形成的矩阵。由表2可构成的判断矩阵有 J_{O-F} 、 J_{F_1-S} 、 J_{F_2-S} 、 J_{F_3-S} 等4个,分别是 O 对 F ,以及 F_1 、 F_2 、 F_3 对 S 层的判断矩阵,采用1~9标度法确定各判断矩阵的元素值,计算各判断矩阵的相对权重 (α 、 W_1 、 W_2 、 W_3),如表3~6所示。

表3 准则层对目标层判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of criterion tiertotargettier

J_{O-F}	O	F_1	F_2	F_3	权重 α
	F_1	1	2	3	0.540
	F_2	1/2	1	2	0.297
	F_3	1/3	1/2	1	0.163

表4 传动效率指标判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of transmission efficiency index

J_{F_1-S}	F_1	S_1	S_2	S_3	权重 W_1
	S_1	1	3	5	0.648
	S_2	1/3	1	2	0.230
	S_3	1/5	1/2	1	0.122

表5 解绕性能指标判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of unwinding performance index

J_{F_2-S}	F_2	S_1	S_2	S_3	权重 W_2
	S_1	1	1/5	1/7	0.240
	S_2	5	1	1/3	0.373
	S_3	7	3	1	0.387

表6 制造成本指标判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of manufacturing cost index

J_{F_3-S}	F_3	S_1	S_2	S_3	权重 W_3
	S_1	1	1/3	1/5	0.105
	S_2	3	1	1/3	0.258
	S_3	5	3	1	0.637

各判断矩阵的一致性检验指标 $F.S$ 构造如下:

$$F.R = \frac{F.S}{R.S} = \frac{1}{R.S} \cdot \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 表示判断矩阵的最大特征值, n 表示判断矩阵的阶数, $R.S$ 为随机指标,用来对 $F.S$ 的值进行修正。若 $F.R \leq 0.10$,则认为判断矩阵具有满意的一致性,否则必须重新调整判断矩阵中元素的值。

由判断矩阵 J_{O-F} 、 J_{F_1-S} 、 J_{F_2-S} 、 J_{F_3-S} 可得到它们的最大特征值 λ_{\max} ,分别为3.009 2、3.003 7、3.064 9、3.038 5。判断矩阵的阶数 $n = 3$,随机指标 $R.S$ 取值为0.52。由式(2)可得 $O.R = 0.088$, $F_1.R = 0.036$, $F_2.R = 0.624$, $F_3.R = 0.37$,都小于0.10,所以4个判断矩阵均满足一致性要求。

对各判断矩阵的相对权重 (α 、 W_1 、 W_2 、 W_3) 进行组合权重 V 计算,如表7所示。

表7 组合权重计算表

Table 7 Calculation table of combination weight

α	F_1	F_2	F_3	组合权重 V
	0.540	0.297	0.163	
S_1	0.648	0.230	0.122	0.438
S_2	0.072	0.279	0.649	0.228
S_3	0.105	0.258	0.637	0.237

由表7中组合权重的计算结果可知,3个方案的优劣顺序为 S_1 、 S_3 、 S_2 ,所以应当选用方案 S_1 作为首选的设计方案。

1.5 机械构型设计

根据方案 S_1 设计出正交轴色谱仪的机械构型,如图3所示。

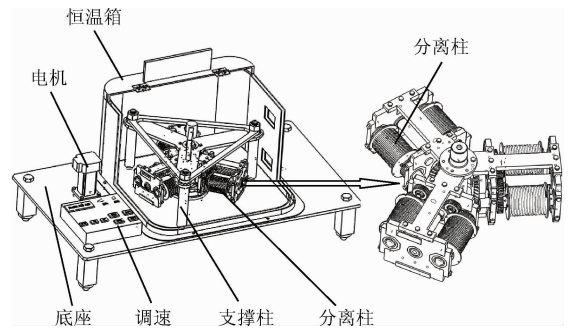


图3 正交轴色谱仪的机械构型

Fig. 3 Mechanical construction of cross-axis chromatograph

图3中的机械构型具有3个结构相同且呈轴对称分布的分离单元,充分利用有限的旋转空间。通过采用锥齿轮与直齿轮配合传动的方式,以实现分离单元中的分离柱在随旋转部分公转的同时作与公转轴垂直的等速自转,且各转子的重心都在转子的轴线上,故能够保证在高速旋转的状态下正交轴色谱仪具有良好的平衡稳定性。在样机内部采用同向转动解绕原理来解决分离管打绞而不需另加解绕轴,利用分离柱支架自身来固定直齿轮的轴向运动而不需另加法兰以增加旋转部分的重量,从而减小了旋转部分的转动惯量。此外,各分离单元之间通过串并联变换可同时分离一种、两种及3种样品。

综上,先根据正交轴色谱仪中转子的运转方式要求和结构特点,在借鉴现有不同类型高速逆流色谱仪的机械构型基础上,综合出满足设计要求的不同种设计方案,采用层次分析法在传动效率、解绕性能以及制造成本3个方面对组合后所选择的各方案进行分析评定,表明由本文所选方案而得出的新颖机械构型具有传动效率、解绕性能好及制造成本低等特点,为后期正交轴色谱仪物理样机的建造提供依据。同时,形成一套正交轴色谱仪的设计方法,为后续正交轴色谱仪的设计提供依据。

2 动力学分析

2.1 驱动力矩

设正交轴色谱仪系统 $\{B\}$ 由主刚体 B 及9个转子 B_i ($i=1,2,\dots,9$)组成,如图4所示。转子 B_i 相对主刚体 B 绕旋转轴转动,角速度为 ω_0 ,旋转轴的单位矢量为 k 。转子 B_i 在绕主刚体 B 以角速度 ω_0 公转的同时又作以角速度为 ω_i 的自转,且 $\omega_i = \omega$ 。转子 B_i 的质量为 m_i ,长度为 L_i ,半径为 r_i ,质心在动坐标系 $o-xyz$ 中的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,离原点 O 的距离为 l_i ($i=1,2,\dots,9$)。

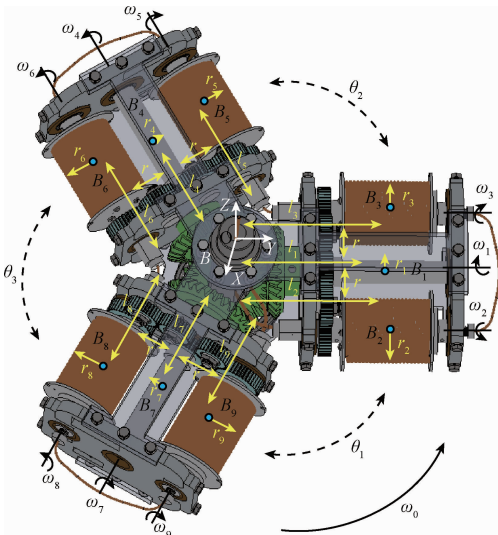


图4 正交轴色谱仪的示意图

Fig. 4 Diagram of cross-axis chromatograph

理想状态下(不存在摩擦力,各转子的质心位于各转子的轴线上),对转子 B_i 相对于其质心的动量矩^[12-13]进行分析,转子 B_i 的角速度为:

$$\omega_{i0} = \omega_i + \omega_0 \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (3)$$

转子 B_i 对其质心的动量矩为:

$$\mathbf{H}_{B_i G_i} = \begin{bmatrix} I_{ix} & -I_{ixy} & -I_{ixz} \\ -I_{iyx} & I_{iy} & -I_{iyz} \\ -I_{izx} & -I_{izy} & I_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_{iy} \\ \omega_{iz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对主刚体 B 进行分析,主刚体 B 的角速度为:

$$\omega_0 = \omega_0 k \quad (5)$$

主刚体 B 的对 O 点动量矩为:

$$\mathbf{H}_{BO} = I_B \cdot \omega_0 = I_{Bz} \omega_0 k \quad (6)$$

综合上述可得转子 B_i 及主刚体 B 对 O 的动量矩为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_{BO} + \sum_{i=1}^9 \mathbf{H}_{B_i G_i} = I_{Bz} \omega_0 k + \sum_{i=1}^9 \mathbf{H}_{B_i G_i} \quad (7)$$

当转子 B_1, B_4, B_7 参数相同,转子 $B_2, B_3, B_5, B_6, B_8, B_9$ 参数相同,且 $\omega_i = \omega_0, \varepsilon_i = \varepsilon_0$ 时,由动量矩定理可知,系统所受外力等于系统的有效力,系统的有效力为:

$$\sum M = H \left\{ I_{Bz} + \sum_{i=1}^9 \left[m_i l_i^2 + \frac{1}{12} m_i (3r_i^2 + L_i^2) \right] \right\} \varepsilon_0 k \quad (8)$$

将式(8)中的力矩转化到电机轴上,可得驱动力矩 τ 为:

$$\tau = K_3 I^2 \varepsilon_0 \quad (9)$$

式中: K_3 为系统折算到电机轴上的转动惯量, I 为系统与电机轴之间的转速比。

通过动量矩定理建立了正交轴色谱仪的刚体动力学模型,可得,正交轴色谱仪转化到电机轴上的驱动力矩与各转子相对于定坐标系原点的转动惯量、转速比平方及角加速度呈线性关系,并以此线性关系及驱动力矩为依据,对后续样机中的电机进行选型。

3 模态分析

建立正交轴色谱仪系统的有限元模型,对系统进行模态分析^[14-15],得到系统的临界转速,最大变形及变形位置,找出系统的薄弱环节,并进行优化,以了解系统的振动特性。

为了提高模态分析的计算精度,选用20节点六面体Solid186单元。网格大小设置为2 mm,节点总数为3 137 481,单元总数为870 262。施加固定约束,选择total deformation进行求解。可得正交轴色谱仪系统的有限元模型如图5所示。正交轴色谱仪系统的前六阶模态振型如图6所示。

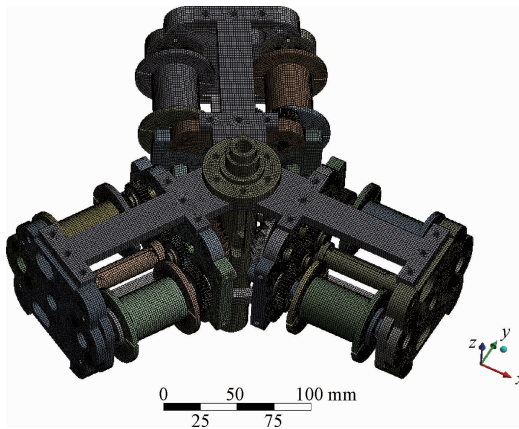


图5 正交轴色谱仪有限元模型

Fig. 5 Finite element model of cross-axis chromatograph

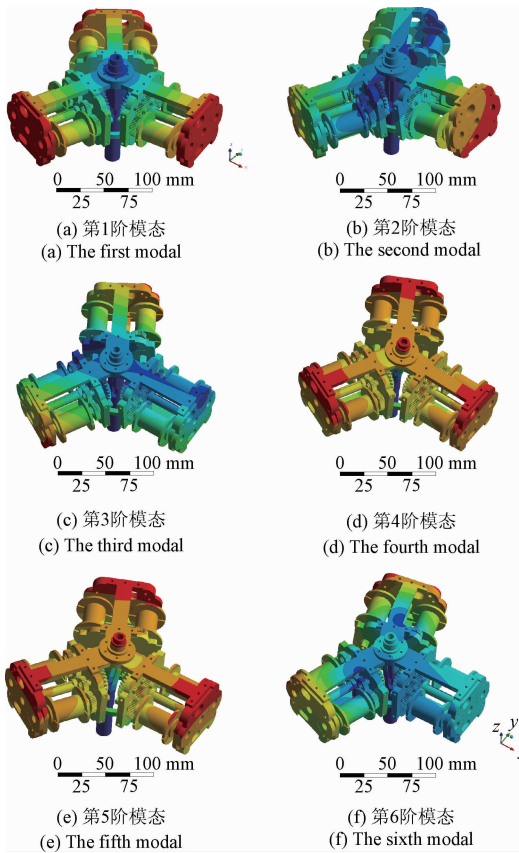


图6 正交轴色谱仪前六阶振型云图

Fig. 6 First six vibration mode of cross-axis chromatograph

由图6可得出正交轴色谱仪系统的各阶临界转速、最大变形及变形位置,具体如表8所示。

由表8可知,正交轴色谱仪系统的临界转速为1 995.96 r/min,一阶固有频率与二阶固有频率相差不大,四阶与五阶模态振型的变形较小,其余模态振型相对较大,最易变形位置发生在外分离柱支架处。

表8 正交轴色谱仪的各阶临界转速,最大变形及变形位置

Table 8 Critical speed, the maximum deformation and its position of cross-axis chromatograph

阶数	临界转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	最大变形/mm	变形位置
1	1 995.96	13.861	整体外端
2	5 148.66	19.198	外分离柱支架右下端
3	5 149.92	19.196	外分离柱支架左端
4	8 334.6	11.329	外分离柱支架上端
5	8 335.8	11.319	外分离柱支架上端
6	19 107.6	20.364	外分离柱支架左上端

通过模态分析得出正交轴色谱仪系统的临界转速为1 995.96 r/min,最易变形位置发生在外分离柱支架处。并以最易变形位置为依据对机械构型进行优化,且临界转速为后续的样机实验作依据,避免在实验过程中,样机的运行转速临近临界转速,以提高样机的使用寿命。

4 样机建造

在结构设计、动力学分析与模态分析的基础上,综合考虑平衡稳定性、综合传动效率、转动惯量、解绕性及制造成本等方面,建造出含有3个结构相同分离单元且呈轴对称分布的正交轴色谱仪样机^[16],样机的结构如图7所示。

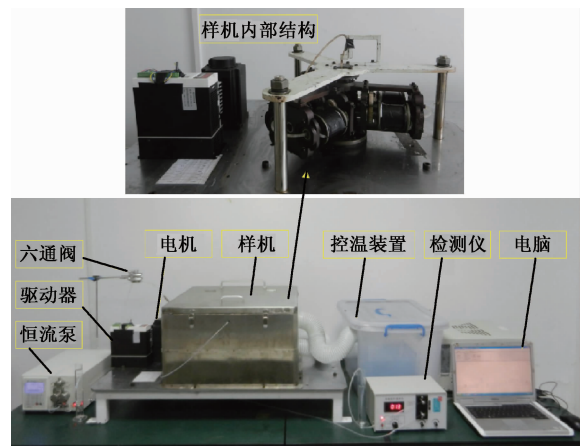


图7 正交轴色谱仪样机

Fig. 7 Prototype of Cross-axis Chromatograph

样机研制过程中考虑以下技术要点。

- 1) 平衡稳定性:利用有限的旋转空间,使具3个结构相同的分离单元呈轴对称分布,追求良好的平衡稳定性;
- 2) 综合传动效率:公转采用齿轮传动,自转采用锥齿

轮与直齿轮结合传动,追求良好的传动效率;

3)低转动惯量设计:设计中尽量追求低转动惯量设计准则,利用支架自身来固定传动齿轮而不需另加法兰以减轻重量,使得转动部分的转动惯量减小;

4)解绕性方面:通过同向转动解绕原理来解决分离管缠绕;

5)制造成本控制:由于通过同向转动解绕原理来解决分离管缠绕,而没有采用密封接头,所以使得制造成本降低。

5 实验分析

5.1 分离效率与固定相保留率之间的关系

高速逆流色谱仪中的分配效率^[1-2]通常采用两个参数进行描述,分离度(R_s)和理论塔板数(N),理论塔板数也称分离效率, R_s 和 N 之间的关系如下:

$$R_s = \frac{\sqrt{N}}{4} \frac{K_{D2} - K_{D1}}{1/S_f - [1 - (K_{D2} + K_{D1})/2]} \quad (18)$$

由式(18)可得,分离效率随着固定相保留率(S_f)的值的增大而提高,所以,采用固定相保留率(S_f)来表征正交轴色谱仪的分离效率。

5.2 固定相保留率测试

洗脱模式1,公转转向为逆时针,下相为流动相时,1~6号分离柱中液体由首端流向尾端,由内向外洗脱。洗脱模式2,公转转向为逆时针,上相为流动相时,1~6号分离柱中液体由尾端流向首端,由外向内洗脱。样机中分离柱的编号如图4所示。

在洗脱模式1情况下进行实验,所用体系为13.96%柠檬酸钠,16.54% PEG1000, $TLL = 30$ 。

表9 样机转速对固定相保留率的影响

Table 9 Effect of prototype speed on stationary phase retention

流速/ (ml · min ⁻¹)	转速/ (r · min ⁻¹)	固定相 保留率/%	样机内 温度/°C	总运行 时间/min
0.5	500	38.73	27	14
0.5	600	44.38	27.5	138
0.5	700	49.23	28	131
0.5	800	54.83	29	128
0.5	900	51.44	31	123
0.5	1 000	50.41	33	126

从表9中得出,在样机转速为500~800 r/min时,随着转速的增大,固定相保留率也相应的增大,因为随着转速的增大,分离柱中所用体系受到的离心力增加,混合效率提高,这样更有利于固定相的保留,而当样机转速大于

800 r/min时,此时体系受到的离心力较大,混合效率大幅提高,反而会造成体系由于过度混合而出现乳化现象,导致部分固定相会随着流动相从分离柱中流出,从而使体系的固定相保留率下降。

在洗脱模式1情况下进行实验,所用体系为13.56% PEG4000,10.61%柠檬酸钠,2% NaCl。

表10 流速对固定相保留率的影响

Table 10 Effect of flow rate on stationary phase retention

流速/ (ml · min ⁻¹)	转速/ (r · min ⁻¹)	固定相 保留率/%	样机内 温度/°C	总运行 时间/min
0.5	500	43.4	22	138
0.3	500	49.43	22	360

从表10可以得出,在样机转速一定的情况下,流速越大,固定相的保留率越低,这是因为在相同转速条件下,随着流速增加,混合时间会相应的减少,使得混合效果下降,从而导致固定相保留率降低。

在洗脱模式2情况下进行实验,所用体系为:13.96%柠檬酸钠,16.54% PEG1000, $TLL = 30$ 。

表11 固定相保留率测定结果

Table 11 Test results of stationary phase retention

流速/ (ml · min ⁻¹)	转速/ (r · min ⁻¹)	固定相 保留率/%	样机内 温度/°C	总运行 时间/min
0.5	500	20.85	24	172
0.5	800	48.97	29	135

从表11可以得出,采用洗脱模式2进行固定相保留率测定时,对于13.96%柠檬酸钠,16.54% PEG1000体系也可以得到较高的固定相保留率。不过相对于洗脱模式1,在相同实验条件下,其固定相保留率略低。

通过实验得出,在一定范围内,随样机转速的增加,样机的固定相保留率增大,分离效率增高,当转速达到800 r/min时,样机的固定相保留率最大,当转速超过800 r/min时,样机的固定相保留率减小,分离效率降低,而当样机转速一定时,样机中液体的流速越大,样机的固定相保留率越低。

6 结论

本文针对需求,研究正交轴色谱仪的设计方法,综合出机械构型,分析其机械性能,研制样机并进行实验测试,得出以下结论。

1)根据正交轴色谱仪中转子的运转方式要求并对机械运动方案进行功能分解,选用与分功能对应的机构进

行组合,得到符合要求的不同种设计方案,然后,采用层次分析法对所选择的设计方案进行分析评定,通过对传动效率、解绕性能及制造成本3个方面的综合比较,选出优良的设计方案;

2)通过动量矩定理建立正交轴色谱仪的刚体动力学模型,可得正交轴色谱仪转化到电机轴上的驱动力矩与各转子相对于定坐标系原点的转动惯量、转速比的平方及角加速度呈线性关系,并以此线性关系及驱动力矩为依据,对后续样机中的电机进行选型;

3)通过模态分析得出正交轴色谱仪系统的临界转速为1 995.96 r/min,其最易变形位置发生在外分离柱支架处,并以最易变形位置为依据对机械构型进行优化,且临界转速为后续的样机实验作依据,避免在实验过程中,样机的运行转速临近临界转速,以提高样机的使用寿命;

4)综合考虑平衡稳定性、综合传动效率、转动惯量、解绕性及制造成本等方面,建造出含有3个结构相同分离单元且呈轴对称分布的正交轴色谱仪样机;

5)在一定范围内,随样机转速的增加,样机的固定相保留率增大,分离效率增高,当转速达到800 r/min时,样机的固定相保留率最大,当转速超过800 r/min时,样机的固定相保留率减小,分离效率降低,而当样机转速一定时,样机中液体的流速越大,样机的固定相保留率越低。

参考文献

- [1] 张天佑,王晓.高速逆流色谱分离技术[M].北京:化学工业出版社,2011.
ZHANG T Y, WANG X. High speed counter current chromatography[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [2] 曹学丽.高速逆流色谱分离技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
CHAO X L. Separation technology and application of high speed counter current chromatography [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [3] SHINOMIYA K, YANAGIDAIRA K, ITO Y. New small-scale cross-axis coil planet centrifuge the design of the apparatus and its application to counter-current chromatographic separation of proteins with aqueous-aqueous polymer phase systems [J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1104(1-2): 245-255.
- [4] 张天佑.正交轴水平流通式逆流色谱仪的研究[J].仪器仪表学报,1990,11(1):16-23.
ZHANG T Y. Study on cross-axis synchronous flow-through coil planet centrifuge for large-scale preparative

countercurrent chromatography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1990, 11(1): 16-23.

- [5] 张天佑,邓秋云,辜克荣.正交轴多分离柱逆流色谱仪,中国专利:02226135.4[P].2002-12-25.
ZHANG T Y, DENG Q Y, GU K R. Multiple separation column cross-axis counter flow chromatograph, China Patent:02226135.4[P]. 2002-12-25.
- [6] 苗琳,官雪梅,官秀洪.一种可以切换分离柱的正交轴逆流色谱仪,中国专利:201020571513.3,[P].2011-06-15.
MIAO L, GUAN X M, GUAN X H. A cross-axis counter flow chromatograph capable of switching off separating column, China Patent:201020571513.3 [P]. 2011-06-15.
- [7] 赵永杰,邹德金,刘杨,等.正交轴逆流色谱仪,中国专利:20131016256.1[P].,2015-02-11.
ZHAO Y J, ZOU D J, LIU Y, et al. Cross-axis counter flow chromatograph, China Patent:20131016256.1 [P]. 2015-02-11.
- [8] 赵永杰,刘杨,邹德金.一种正交轴逆流色谱仪,中国专利:201510255241.5[P].2016-10-12.
ZHAO Y J, ZOU D J, LIU Y. A cross-axis counter flow chromatograph, China Patent: 201510255241.5 [P]. 2016-10-12.
- [9] 黄云程,蔡金锭.融合改进层次分析与灰色关联法评估油纸绝缘状态[J].仪器仪表学报,2015,36(9):2083-2090.
HUANG Y CH, CAI J D. Fusing improved analytic hierarchy process and grey correlation method to evaluate oil-paper insulation condition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9):2083-2090.
- [10] 蔡瑾曜,刘杰,黄珂.船载测控系统可靠性综合评估方法研究[J].电子测量技术,2014,37(7):111-114.
CAI J Y, LIU J, HUANG K. Research of reliability comprehensive evaluation method for ship TT&C system[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(7):111-114.
- [11] 黄鹏,陈怀海,贺旭东.空间机构正交双轴转动对基体的扰动分析[J].国外电子测量技术,2014,33(2):37-40.
HUANG P, CHEN H H, HE X D. Analysis of the disturbance to the base of the space mechanism in two-orthogonal-axle rotating [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2):37-40.
- [12] 赵蓓蕾,周向阳.航空遥感惯性稳定平台建模与控制系统设计[J].电子测量与仪器学报,2016,30(10):

1543-1550.

ZHAO B L ZHOU X Y. Control system modeling and design of aerial remote inertial stabilized platform [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(10):1543-1550.

- [13] KOU Z W, CAO H L, SHI Y B, et al. Structure design and simulation of MEMS vibrating rind gyroscope [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2016, 7(1):78-83.

- [14] 乔龙学, 杜耀华, 陈锋, 等. 多模联振式超声波裂解系统的设计与优化 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 48-56.

QIAO L X, DU Y H, CHEN F, et al. Design and optimization analysis of ultrasonic lysis system based on multi-mode synchronous resonance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):48-56.

- [15] BAI B, ZHANG L X, GUO T, et al. Analysis of dynamic characteristics of the main shaft system in a hydro-turbine based on ANSYS [J]. Procedia Engineering, 2012, 31(16): 654-658.

- [16] YIN X. Virtual assembly with physical information: A review [J]. Assembly Automation, 2015, 35(3): 206-220.

作者简介



邹德金, 2011年于九江学院获得学士学位, 2014年于汕头大学获得硕士学位, 现为北京方圆嘉禾知识产权代理有限公司江西分公司专利代理人, 主要研究方向为高速逆流色谱仪与知识产权。

E-mail: 18107009891@163.com

Zou Dejin received his B. Sc. degree from Jiujiang of University in 2011 and received his M. Sc. degree from Shantou of University in 2014. Now he is a Patent Agent in Peking Tsingyihua Intellectual Property LLC. Nanchang Branch. His main research interests include high-speed countercurrent chromatography and intellectual property.



赵永杰 (通讯作者), 2000年于东北大学获得学士学位, 2006年于天津大学获得博士学位, 现为汕头大学教授, 主要研究方向为机械设计及理论、机器人技术。

Email: meyzhao@stu.edu.cn

Zhao Yongjie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northeastern University in 2000, and Ph. D. degree from Tianjin University in 2006. Now he is a professor in Shantou University. His main research interest include mechanism, machine design and robotics.