



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXX—XXXX

磁悬浮自轴承泵送系统应用规范

Application specification for maglev self-bearing pumping system

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目录

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 泵送系统要求 7

5 试验方法 14

6 泵送系统应用 16

附 录 A （资料性） 泵送系统在生物制药行业的应用示意图 18

附 录 B （资料性） 泵送系统在半导体行业的应用示意图 20

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定执行起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国磁悬浮动力技术基础与应用标准化工作组（SAC/SWG28）与全国泵标准化技术委员会（SAC/TC211）共同归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

磁悬浮自轴承泵送系统应用规范

1 范围

本文件界定了磁悬浮自轴承泵送系统（以下简称泵送系统）的术语和定义，规定了泵送系统的要求，描述了其试验方法及泵送系统应用。

本文件适用于功率为 30 W～10 kW 的磁悬浮自轴承泵送系统在半导体、生物制药、化工、食品等行业运输高洁净液体介质的应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1690 硫化橡胶或热塑性橡胶 耐液体试验方法

GB/T 3216—2016 回转动力泵 水力性能验收试验 1级、2级和3级

GB/T 7021 离心泵名词术语

GB/T 9330—2020 塑料绝缘控制电缆

GB/T 10610 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法

GB/T 11547 塑料 耐液体化学试剂性能的测定

GB/T 13006 离心泵、混流泵和轴流泵 汽蚀余量

GB/T 13468—2013 泵类液体运输系统电能平衡测试与计算方法

GB/T 29529—2013 泵的噪声测量与评价方法

GB/T 29531—2013 泵的振动测量与评价方法

GB/T 30790.2—2014 色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第2部分：环境分类

GB/T 30790.6 色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第6部分：实验室性能测试方法

GB/T 42076.1 生物技术 细胞计数 第1部分：细胞计数方法通则

GB/T XXXX 磁悬浮动力技术 术语

中国药典 2020年版 第四部

SEMI F40 半导体制造设备中与晶圆接触的聚合物材料评估指南（Guide for Evaluation of Polymer Materials Used in Semiconductor Manufacturing Equipment in Contact with Wafer）

SEMI F57-0622 超纯水和液体化学品分配系统用高纯度聚合物材料和部件规范（Specification For High Purity Polymer Materials And Components Used In Ultrapure Water And Liquid Chemical Distribution Systems）

ASTM D4779 用紫外线（UV）或过硫酸盐氧化法或两者结合法和红外检测法测定高纯水中总碳、有机碳和无机碳的标准试验方法（Standard Test Method for Total,Organic,and Inorganic Carbon in High Purity Water by Ultraviolet (UV) or Persulfate Oxidation,or Both,and Infrared Detection）

USP-NF 2022 美国药典-国家处方集（United States Pharmacopeia-National Formulary）

3 术语和定义

GB/T 7021、GB/T 13468、GB/T XXXX 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

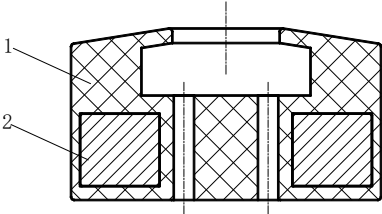
3.1

转子磁体 rotor magnet

与转子叶轮一体化设计的磁性旋转运动件。

注 1：转子磁体既是转子叶轮的一部分，又是自轴承薄片电机的转子。

注 2：转子磁体可以是永磁材料，也可以是软磁材料。一种转子磁体与转子叶轮一体化设计结构示例见图 1。



标引序号说明：

1——转子叶轮；

2——转子磁体。

图 1 一种转子磁体与转子叶轮一体化设计结构

3.2

励磁线圈 field coil

在磁悬浮轴承定子铁心中产生磁通的线圈。

[来源：GB/T XXXX—XXXX，4.2.9]

3.3

旋转励磁线圈 rotating field coil

驱动励磁线圈 drive field coil

在磁悬浮轴承定子铁心中产生旋转控制磁通的线圈。

3.4

悬浮励磁线圈 levitation field coil

在磁悬浮轴承定子铁心中产生悬浮控制磁通的线圈。

3.5

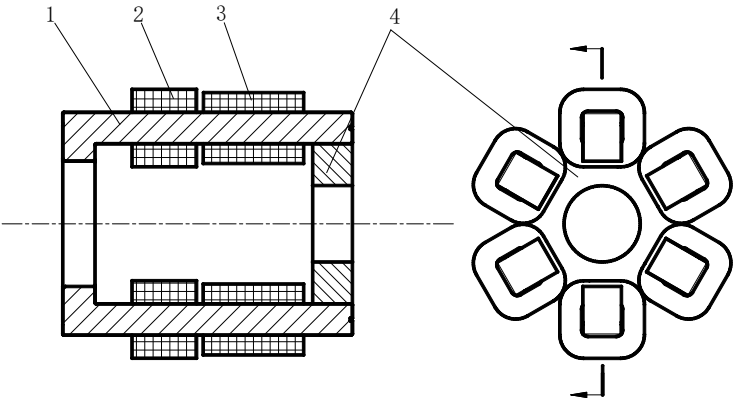
自轴承定子 self-bearing stator

电机及轴承定子 motor and bearing stator

磁悬浮轴承定子与电动机定子使用同一组定子铁心，由定子铁心上的励磁线圈产生相互叠加的旋转控制磁通和悬浮控制磁通的定子。

注 1：电机及轴承定子既是电动机旋转驱动的定子，又是磁悬浮轴承的定子。

注 2：自轴承定子主要由定子铁心、励磁线圈和导磁体组成。励磁线圈包括单绕组和双绕组两种结构，双绕组的励磁线圈包括旋转励磁线圈和悬浮励磁线圈；单绕组的励磁线圈既产生旋转控制磁通又产生悬浮控制磁通，一种双绕组的自轴承定子结构示例见图 2。



标引序号说明：

- 1——定子铁心；
- 2——悬浮励磁线圈；
- 3——旋转励磁线圈；
- 4——导磁体。

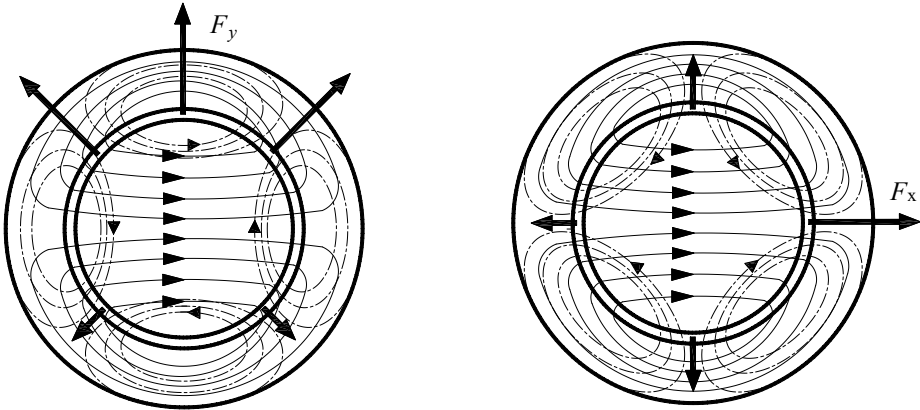
图2 一种双绕组的自轴承定子结构（6极）

3.6

P 极磁通 **p-pole magnetic flux**
电动机（极数为 P）P 个极的总磁通。

3.7

两自由度主动磁悬浮 **two-degree-of-freedom active maglev**
利用旋转励磁线圈产生的 P 极磁通与悬浮励磁线圈产生的 P±2 极磁通相互叠加产生可控磁悬浮力，定子驱动转子在 X 方向、Y 方向这两个自由度上主动地悬浮于平衡位置。
注：两自由度主动磁悬浮原理见图 3。图 3 a) 中 X 方向悬浮力由实线表示的 2 极磁通（P）与虚线表示的 4 极磁通（P+2）叠加产生，左侧磁通叠加后减弱，右侧磁通叠加后增强。图 3 b) 中 Y 方向悬浮力由实线表示的 2 极磁通（P）与虚线表示的 4 极磁通（P+2）叠加产生，下侧磁通叠加后减弱，上侧磁通叠加后增强。



a) X 方向悬浮力的产生

b) Y 方向悬浮力的产生

标引序号说明：

F_x ——X方向悬浮力;
 F_y ——Y方向悬浮力。

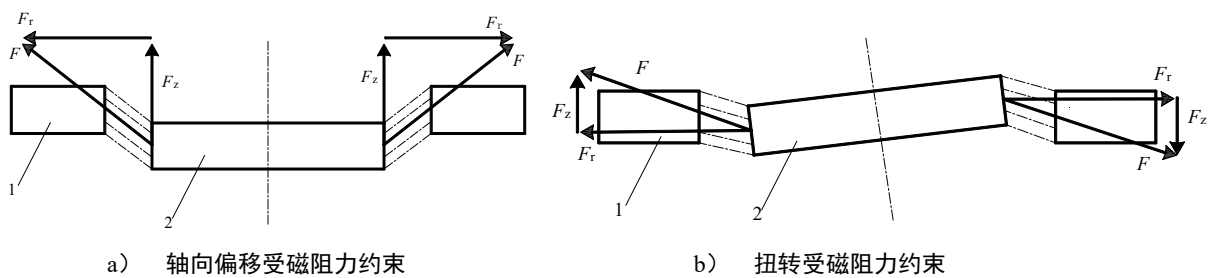
图 3 两自由度主动磁悬浮原理

3.8

三自由度被动磁悬浮 three-degree-of-freedom passive maglev

利用磁路磁阻力最小的原理，转子在 Z 方向、绕 X 轴扭转方向、绕 Y 轴扭转方向这三个自由度上受定子磁阻力约束，无需对其进行控制即可被动地悬浮于平衡位置。

注：三自由度被动磁悬浮原理见图 4。图 4 a) 中转子在 Z 方向偏离平衡位置时，受定子磁阻力约束可恢复至平衡位置，图 4 b) 中转子在绕 X 轴或 Y 轴扭转偏离平衡位置时，受定子磁阻力约束可恢复至平衡位置。



标引序号说明：

- 1——定子;
- 2——转子;
- F ——定子磁阻力;
- F_r ——定子磁阻力径向分力;
- F_z ——定子磁阻力轴向分力。

图 4 三自由度被动磁悬浮原理

3.9

自轴承薄片电机 self-bearing slice motor

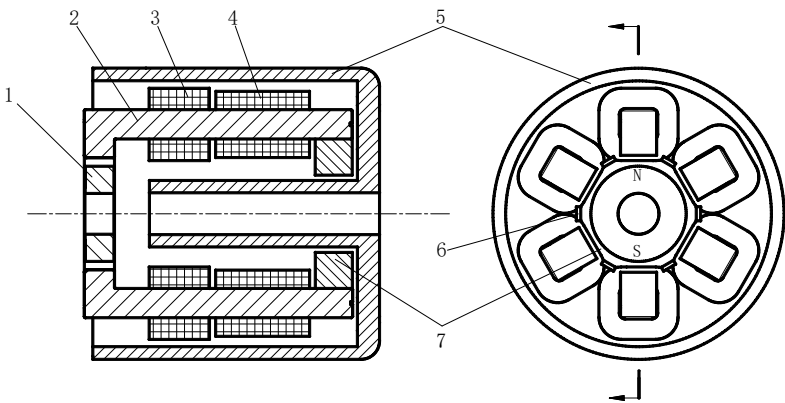
无轴承薄片电机 bearingless slice motor

在 P 极磁通的旋转控制之外，利用 P+2 或 P-2 极磁通作为悬浮控制的转子轴向尺寸小于径向尺寸的电动机。

注 1：自轴承薄片电机主要由转子磁体、自轴承定子和机壳组成，一种双绕组的自轴承薄片电机结构示例见图 5。

注 2：自轴承薄片电机的转子磁体相对于自轴承定子五自由度磁悬浮，其中，两自由度主动磁悬浮，三自由度被动磁悬浮。

注 3：自轴承薄片电机不设置单独的磁悬浮轴承。



- 标引序号说明：
- 1——转子磁体；
 - 2——定子铁心；
 - 3——悬浮励磁线圈；
 - 4——旋转励磁线圈；
 - 5——机壳；
 - 6——传感器；
 - 7——导磁体。

图 5 一种双绕组的自轴承薄片电机结构（定子 6 极）

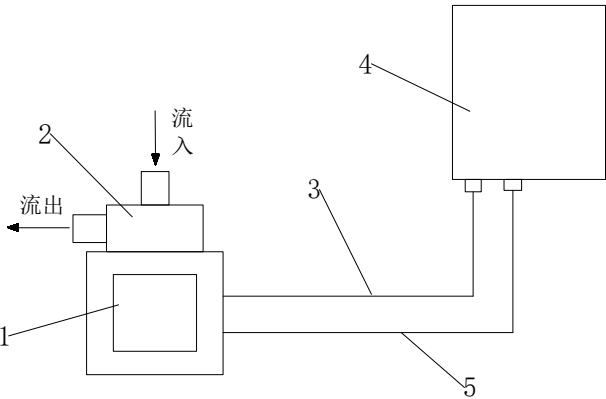
3.10

磁悬浮自轴承泵送系统 maglev self-bearing pumping system

用自轴承薄片电机作动力，转子磁体与转子叶轮一体化设计并置于泵头内，工作时转子叶轮与泵头无机械接触的泵系统。

注 1：泵送系统一般用于运输高洁净液体介质，泵送系统主要由泵头、自轴承薄片电机（以下简称泵机）及控制器组成。

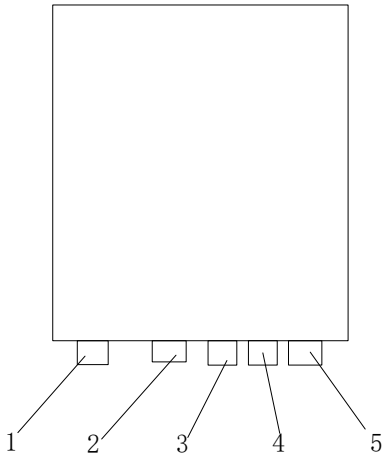
注 2：一种磁悬浮自轴承泵送系统组成见图 6。一种控制器接口示意图示例见图 7。



- 标引序号说明：
- 1——泵机；
 - 2——泵头；

- 3——传感器线缆；
- 4——控制器；
- 5——功率线缆。

图 6 泵送系统组成



标引序号说明：

- 1——传感器线缆接口；
- 2——功率线缆接口；
- 3——用户接口；
- 4——服务接口；
- 5——电源接口。

图 7 一种控制器接口示意图

3. 11

悬浮间隙 levitation gap

工作状态下，磁悬浮动子与定子之间的法向距离。

[来源：GB/T XXXX—XXXX，3.28]

3. 12

径向悬浮间隙 radial levitation gap

工作状态下，转子叶轮径向外壁与蜗壳转子腔侧壁之间的法向距离。

3. 13

轴向悬浮间隙 axial levitation gap

工作状态下，转子叶轮轴向顶部与上蜗壳内壁之间的法向距离或转子叶轮轴向底部与蜗壳转子腔底部之间的法向距离。

3. 14

擦壳保护 casing rub protection

泵送系统的一种保护机制，防止蜗壳内转子叶轮与蜗壳发生接触或碰撞。

注：通过传感器和控制器软件来实时监测并控制电磁场来保持转子叶轮与蜗壳之间的间隙，确保两者之间不会发生物理接触。

3. 15

调节时间 settling time

过渡时间 transit time

指控制系统受到扰动作用后，被控变量从原稳定状态回复到新的平衡状态所经历的最短时间。

注：实际应用时，规定只要被控变量进入新的稳态值的±5%的范围而且不再越出时为止所经历的最短时间。

3. 16

洁净度 cleanliness

采用规定方法从规定部位采集到的污染物浓度。

3. 17

泵头洁净度 pump head cleanliness

采用规定方法从泵头的蜗壳和转子叶轮采集到的污染物浓度。

3. 18

运输液体洁净度 transport liquids cleanliness

采用规定方法从工艺流程运输液体中采集到的污染物浓度。

3. 19

泵类系统运行效率 efficiency of pumped liquid transportation system

泵类系统运行时输出功率与输入功率之比。

注：泵送系统的边界与 GB/T 13486 中泵类机组的边界一致。泵类系统包括泵类机组和管网及附属设备。

[来源：GB/T 13468，3.1.1]

3. 20

活细胞密度 viable cell density

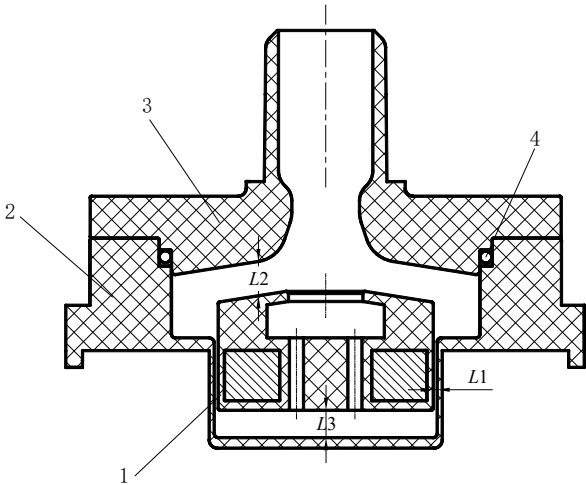
指细胞生长过程中某个时间点内单位体积内活细胞的数量或数目。

4 泵送系统要求

4. 1 泵送系统结构要求

4. 1. 1 泵送系统组成

泵送系统主要由泵头、泵机和控制器组成。泵机主要由机壳、自轴承定子和转子磁体组成。泵头主要由转子叶轮和蜗壳组成。一种泵头结构示例见图 8。

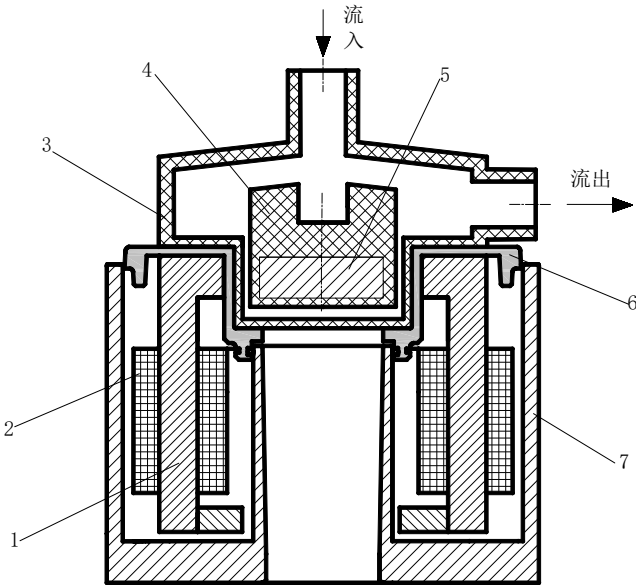


- 标引序号说明：
- 1 —— 转子叶轮；
 - 2 —— 下蜗壳；
 - 3 —— 上蜗壳；
 - 4 —— 密封圈；
 - L1 —— 径向悬浮间隙；
 - L2 —— 第一轴向悬浮间隙；
 - L3 —— 第二轴向悬浮间隙。

图 8 一种泵头结构

4.1.2 泵送系统一般要求

泵机中集成位置传感器，控制器根据位置传感器反馈的转子位置信息控制泵机产生电磁力，驱动泵头内的转子磁体及转子叶轮稳定悬浮和旋转，实现转子磁体及转子叶轮径向两自由度主动磁悬浮，轴向及扭转三自由度被动磁悬浮。带泵头的泵机基本结构见图 9。



标引序号说明：

- 1——定子铁心；
- 2——励磁线圈；
- 3——蜗壳；
- 4——转子叶轮；
- 5——转子磁体；
- 6——机壳压盖；
- 7——机壳。

图 9 带泵头的泵机基本结构

4.1.3 泵头

- 4.1.3.1 泵头的型式为离心式，泵送液体介质沿轴向吸入，沿切线方向排出。
- 4.1.3.2 蜗壳的底部形成转子腔，转子磁体嵌入转子叶轮的主体部分内，转子叶轮置于蜗壳内，工作状态下转子叶轮与蜗壳之间应无机械接触。
- 4.1.3.3 蜗壳由上蜗壳和下蜗壳组成，流体入口位于上蜗壳的中心位置，流体出口位于下蜗壳的侧面，上蜗壳与下蜗壳之间应密封（如采用密封圈密封）连接且可拆卸。

4.1.4 泵机

- 4.1.4.1 泵机的顶部形成定子凹腔，定子凹腔与转子腔应适配。定子铁心磁极围绕定子凹腔周围布置。
- 4.1.4.2 泵机的机壳外表面宜设置散热翅片。
- 4.1.4.3 机壳远离泵头一端的中心位置宜设置沿转子磁体旋转轴线方向的散热孔。

4.1.5 控制器

- 4.1.5.1 控制器应具有用户接口，用户应可以通过用户接口设置泵机的转速，实时监控泵机运行数据，恢复出厂设置等操作。
注 1：用户接口用于实现控制器与用户终端（如电脑、上位机等）的实时通信，用户通过用户终端实时控制泵机并监测其实时状态。
注 2：用户接口如 RS485 接口、PLC 接口等。
- 4.1.5.2 控制器宜设置扩展 PLC 接口，并允许通过扩展 PLC 接口设置泵机的转速。用户通过扩展 PLC 接口采集流量传感器或压力传感器数据，进行精确的闭环流量或压力控制。
- 4.1.5.3 控制器应具有服务接口和电源输入接口。
注：服务接口用于厂家调试或固件更新。服务接口如 RJ45 接口。

4.1.6 线缆

线缆长度不宜超过 10 m，线缆允许弯曲半径应符合 GB/T 9330—2020 中 11.4 的规定。

4.2 泵送系统性能要求

4.2.1 悬浮稳定性

4.2.1.1 悬浮间隙

悬浮间隙包括径向悬浮间隙（L1）、第一轴向悬浮间隙（L2）和第二轴向悬浮间隙（L3）。悬浮间隙是一个多目标优化和平衡的过程，需综合考虑水力性能、结构安全与动态稳定性、泵机性能与功耗、

制造与装配公差和材料选择等因素。转子叶轮与蜗壳之间的悬浮间隙宜满足表 1 的要求。

表 1 转子叶轮与蜗壳之间的悬浮间隙

许用功率 W	径向悬浮间隙 mm	第一轴向悬浮间隙 mm	第二轴向悬浮间隙 mm
20~≤600	≥0.4~≤1	≥1.5~≤9.2	≥1.15~≤5.2
600~≤2000	1~≤1.3	9.2~≤11.3	5.2~≤11.9
2000~≤4000	1.3~≤1.5	11.3~≤17	6.5~≤11.9

注：悬浮间隙过大会降低泵的容积效率、有效流量和扬程，过小会存在擦壳风险以及过载与失控。

4.2.1.2 悬浮运转

泵送系统在许用功率下应悬浮运转平稳，悬浮运转过程中应无擦壳，泵的性能、噪声值、振动值不应有明显的变化。

4.2.1.3 保护机制

4.2.1.3.1 擦壳保护

泵送系统应具有擦壳保护功能。悬浮运转过程中，控制器应监控转子叶轮位置信号。通过采样位置传感器反馈的转子叶轮位置数据，泵送系统实现悬浮运转擦壳保护。

注：一种擦壳保护流程见图 10。以许用功率 600 W 为例，设定安全位移如 0.7 mm，设定极限位移如 0.85 mm。

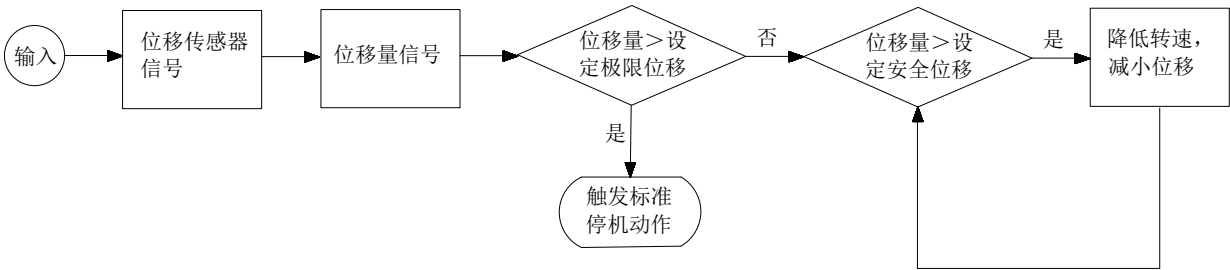


图 10 擦壳保护流程

4.2.1.3.2 断电保护

泵送系统应具备断电保护功能。悬浮运转过程中，控制器应监控电流或电压。通过采样电流传感器或电压传感器反馈的泵机电流数据或电压数据，泵送系统实现悬浮运转断电保护。

注：一种断电保护流程见图 11。以许用功率 600 W 为例，设定最低电压如 35 V。

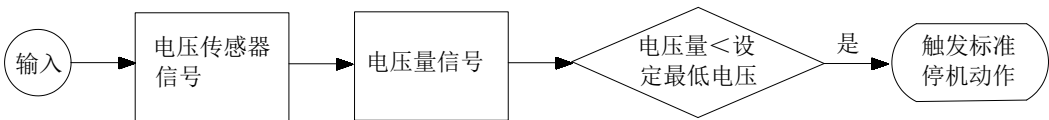


图 11 断电保护流程

4.2.1.3.3 过温保护

泵送系统应具备控制器过温保护功能和泵机过温保护功能。悬浮运转过程中，控制器应监控控制器温度和泵机温度。通过采样温度传感器反馈的控制器温度数据和泵机温度数据，泵送系统实现悬浮运转过温保护。泵送系统宜具备运输液体介质过温保护功能。

注：一种过温保护流程见图 12。控制器设定安全温度如 70℃。泵机设定安全温度如 90℃。设定时间如 10 min。运输液体介质设定安全温度如 90℃。

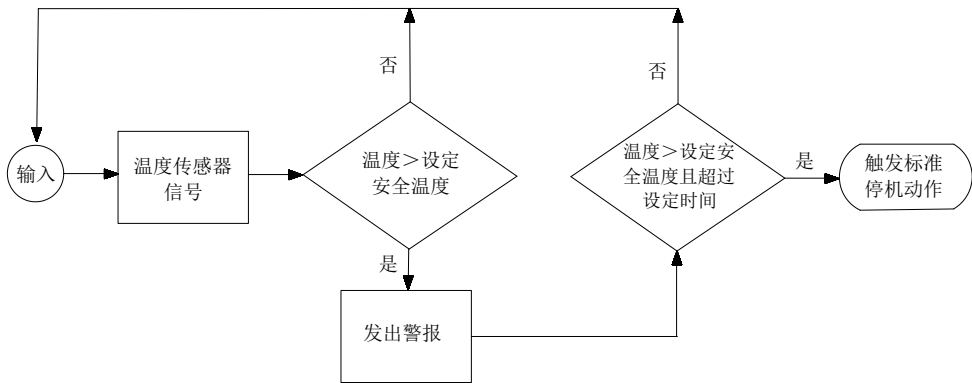


图 12 一种过温保护流程

4.2.1.3.4 停机

泵送系统停机过程不应出现硬碰撞。

注：一种标准停机流程见图 13。

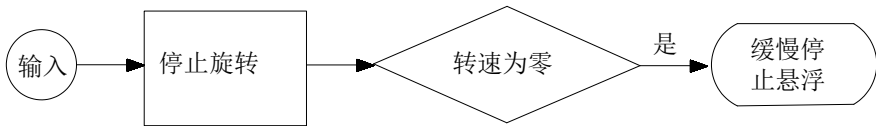


图 13 标准停机流程

4.2.2 控制模式

4.2.2.1 泵送系统应具备速度控制模式和工艺过程控制模式，且不同模式之间应可切换。

4.2.2.2 速度控制模式下，通过采样模拟输入口的电流或电压，配置输入电流或电压与设定转速的对应关系，控制器实现泵机的速度控制。

注：用户可通过软件对电流、电压这两种控制模式进行配置，默认为电流模式。

示例 1：电流与设定转速的对应关系 4-20 mA→0-10 000 r/min。

示例 2：电压与设定转速的对应关系 0-10 V→0-10 000 r/min。

4.2.2.3 工艺过程控制模式包括流量模式和压力模式。流量模式下，通过采样流量传感器反馈的工艺流程中运输液体的流量，控制器实现工艺流程的流量闭环控制。压力模式下，通过采样压力传感器反馈的工艺流程中运输液体的压力，控制器实现工艺流程的压力闭环控制。

4.2.2.4 泵送系统运行出现错误时，控制器进入错误模式。错误模式下，控制器控制泵机立即停止工作。

4.2.3 水力性能

泵送系统水力性能包括流量压力曲线、最大转速、最大流量和最大压力，各许用功率下，最大转速、最大流量和最大压力应不低于表 2 的要求。常用许用功率最大流量压力曲线示例见图 14。

表 2 水力性能参数

许用功率 W	最大转速 r/min	最大流量 L/min	最大压力 MPa
0~≤30	12 600	13.3	0.102
30~≤200	9000	21.2	0.225
200~≤600	8100	68.4	0.288
600~≤2000	9000	126	0.612
2000~≤4000	7200	252	0.558

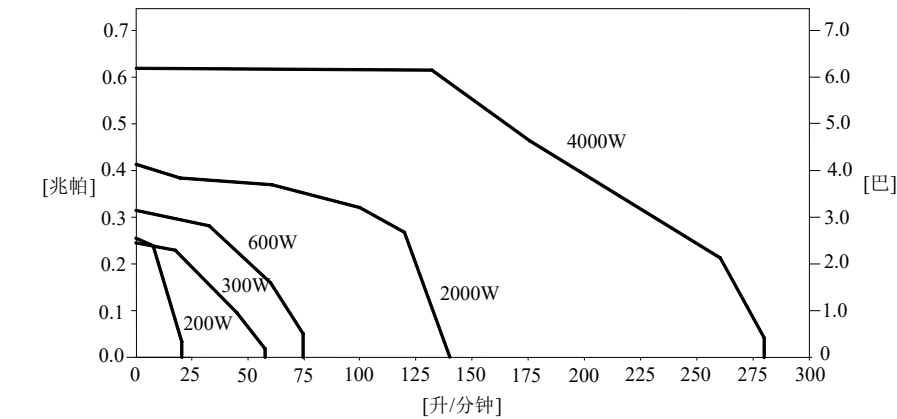


图 14 常用许用功率最大流量压力曲线

4.2.4 性能曲线

泵送系统性能曲线应至少包括流量压力曲线，在各许用功率下，流量压力曲线应包括与至少 5 个设定转速对应的至少 5 条曲线。

注 1：许用功率如 600 W，5 个设定转速如 4000 r/min、5000 r/min、6000 r/min、7000 r/min、8000 r/min。

注 2：许用功率 600 W 流量压力曲线示例见图 15。

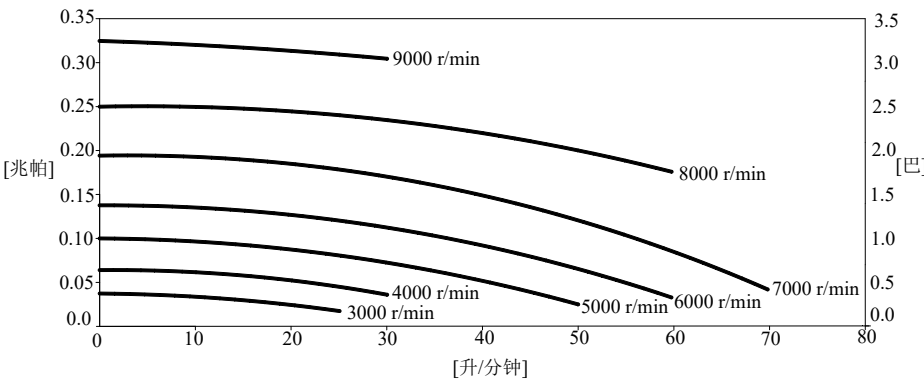


图 15 许用功率 600W 流量压力曲线

4.2.5 流量调节能力

在许用功率下,泵送系统在各设定转速均应能实现从零流量到最大流量连续稳定的流量输出和压力控制。

4.2.6 转速误差

在许用功率下,泵送系统在各设定转速稳定悬浮运转时的转速误差应不高于 5%。

注: 许用功率如 600 W, 设定转速如 4000 r/min、5000 r/min、6000 r/min、7000 r/min、8000 r/min。

4.2.7 调节时间

在许用功率下,泵送系统的调节时间应不大于 5 s。

4.2.8 温度

控制器温度不应超过 80 °C, 泵机温度不应超过 100 °C。

4.2.9 振动

泵送系统的振动烈度应符合 GB/T 29531—2013 中规定的各类别 A 级。

4.2.10 噪声

泵送系统的噪声按 GB/T 29529—2013 的规定执行。转速小于 3000 r/min 的泵送系统的噪声应符合 A 级的规定。转速大于等于 3000 r/min 的泵送系统的噪声应符合 B 级的规定。

注 1: 噪声的测量应在未发生汽蚀的工况下进行。

注 2: 工频 50 Hz 下, 非变频调速的泵转速不超过 3000 r/min, 变频调速的泵转速可以超过 3000 r/min。

4.2.11 密封性

4.2.11.1 泵头的上蜗壳与下蜗壳之间不应泄漏。

4.2.11.2 转子磁体在转子叶轮内应完全密封, 不应泄漏。

4.2.12 防腐性

4.2.12.1 泵头

泵头的蜗壳及转子叶轮应具有防腐性, 防腐性包括耐强酸(如浓度 98%的硫酸)、强碱(如浓度 40%的氢氧化钠)和有机溶剂(如丙酮和二甲苯)等。对于半导体应用, 泵头蜗壳宜采用耐腐的 PTFE 材质, 转子叶轮宜采用耐腐的 PFA 材质、密封圈宜采用耐腐的 FFKM 材质。对于生物制药应用, 泵头蜗壳及转子叶轮宜采用耐腐的 PP 材质, 密封圈宜采用耐腐的 FFKM 材质。

4.2.12.2 泵机

泵机的机壳应具有防腐性, 机壳表面宜进行防腐处理, 防腐等级应符合 GB/T 30790.2—2014 中规定的 C4 级及以上。

4.2.13 洁净度

对于半导体行业应用, 泵送系统运输高洁净液体(超纯水及液态化学品)时, 泵头洁净度应通过 SEMI F57-0622 标准的测试认证, 满足洁净度测试要求, 泵头洁净度测试项目应至少包括污染物测试(金属离子污染、阴离子污染、总有机碳污染)和表面粗糙度测试。

4.2.14 生物相容性

对于生物制药行业应用，泵送系统运输高洁净液体（生物药液及细胞培养液）时，泵头应通过生物相容性测试，生物相容性检测内容至少包括潜在的细菌内毒素、潜在的急性全身毒性、潜在的皮内反应、潜在的细胞毒性。

4.2.15 汽蚀余量

泵送系统的必需汽蚀余量不应有下偏差，偏差应符合 GB/T 13006 的规定执行。

4.2.16 保养

泵送系统应不需润滑，不需机械保养。

5 试验方法

5.1 运转试验

泵送系统在许用功率下至少5个设定转速持续运转至少30 min，检查运转是否平稳、运转过程中有无异常振动和噪声，检查泵头泄漏情况，检查泵机温度、控制器温度情况。

注： 许用功率如600 W，5个设定转速如4000 r/min、5000 r/min、6000 r/min、7000 r/min、8000 r/min。

5.2 水力性能

泵送系统水力性能试验按 GB/T 3216—2016 中 2 级的规定执行。泵送系统水力性能试验包括压力测量、流量测量和转速测量等。

5.3 流量压力曲线

流量压力曲线的绘制和测量方法按 GB/T 3216 的规定执行。

5.4 流量调节能力

带载工况下，通过调节电磁阀逐步改变流量，从零流量调到最大流量，在每种流量下，保持泵送系统稳定悬浮运转，测量各设定转速的压力和流量。

5.5 转速误差

按 GB/T 3216—2016 中 D.2 规定测试各设定转速下泵送系统稳定悬浮运转时的实际转速。并按公式（1）计算各设定转速的转速误差。

$$\delta = \frac{N-n}{n} \times 100\%..... (1)$$

式中：
δ——转速误差；
N——实际转速，单位为转/分（r/min）；
n——设定转速，单位为转/分（r/min）。

5.6 调节时间

带载工况下，设定泵机转速为第一转速（如 2000 r/min）且到达稳定后，设定泵机转速为第二转速（如 8000 r/min）。在设定第二转速时计时开始，达到第二转速且稳定时计时终止。计时开始到计时终

止的时间为调节时间。以上测试进行 3 次取平均值作为最终结果。

注 1：转速误差持续小于设定转速的 $\pm 0.5\%$ 认为转速达到稳定。

注 2：判断转速稳定的持续观察时间应不小于调节时间。

5.7 振动

泵送系统的振动测量方法按 GB/T 29531 的规定执行。

5.8 噪声

泵送系统的噪声测量方法按 GB/T 29529—2013 的规定执行。

5.9 密封性

5.9.1 静水压试验

对泵头进行最大允许工作压力 1.5 倍的静水压试验。试验压力持续时间不少于 10 min，无泄漏。

5.9.2 带载压力试验

带载工况下，对泵头进行带载最大压力测试，带载最大压力测试连续运行时间不少于 24 h，无泄漏。

5.10 防腐性

5.10.1 泵头

将泵头的蜗壳、转子叶轮及密封圈的试样浸泡在特定浓度、温度的强酸、强碱或有机溶剂中。测量浸泡后的体积变化率、质量变化率、硬度变化及拉伸性能保留率中的至少一项。塑料材质的测试按 GB/T 11547 的规定执行，橡胶材质的测试按 GB/T 1690 的规定执行。

5.10.2 泵机

泵机耐腐蚀性试验应至少包括附着力测试、耐化学性测试、耐盐雾性能测试。泵机耐腐蚀性试验按 GB/T 30790.6 的规定执行。

5.11 洁净度

泵头洁净度测试按 SEMI F57-0622 标准执行，分为污染物测试（金属离子污染、阴离子污染和总有机碳污染）和表面粗糙度测试。污染物测试首先使用超纯水对泵头进行清洗，清洗完后使用超纯水浸泡泵头内腔，浸泡时间为一周，测量浸泡前、后超纯水中污染物浓度。根据污染物浓度的增加和泵的内腔面积计算出单位面积污染物的重量（微克/平方米）。金属离子污染及阴离子污染的测试按 SEMI F40 的规定执行，总有机碳污染的测试按 ASTM D4779 的规定执行，表面粗糙度的测试按 GB/T 10610 的规定执行。

5.12 生物相容性

潜在的细菌内毒素测试按《中国药典》2020 年版第四部细菌内毒素检查法进行，潜在的急性全身毒性测试及潜在的皮内反应测试按 USP-NF 2022 第 88 章执行。潜在的细胞毒性测试按 USP-NF 2022 第 87 章执行。

5.13 汽蚀

泵送系统汽蚀试验按 GB/T 3216 的规定执行。

6 泵送系统应用

6.1 环境及使用条件

应用泵送系统应符合如下环境及使用条件：

- a) 工作环境温度范围为 0℃～40℃；
- b) 工作环境湿度范围为 15%～90%（无冷凝）；
- c) 海拔高度为 2000 m 以内；
- d) 直流电源波动为额定电压的±5%；
- e) 运输液体介质温度不超过 90℃。

6.2 一般改造流程

应用泵送系统的一般改造流程包括如下步骤：

- a) 梳理、汇总使用单位生产工艺流程中使用泵送系统的需求，包括位置、数量、参数、液体介质、工艺过程等情况；
- b) 根据使用单位生产工艺流程液体介质、压力、流量、转速、功率等参数，选择泵送系统的型号；
- c) 制定技术/改造实施方案，明确工作步骤、期限、技术路线、工作节点、预期目标等；
- d) 按照泵送系统产品资料要求完成设备系统安装、调试等相关工作；
- e) 设备试运行，记录实施参数、状态等情况，验证是否满足预期目标；
- f) 设备试运行达到既定目标的，设备生产企业与使用单位办理交付手续；
- g) 生产企业或使用单位按照设备文件相关要求安全使用、维护、保养等。

注 1：为充分发挥泵送系统的性能，宜将压力、流量参数与泵送系统组成闭环控制系统。

注 2：为方便交流和实施，建议参考附录 A 或附录 B 绘制应用示意图。

6.3 验证项目

设备安装调试完毕、正常运行后，宜进行应用效果验证，根据工艺流程选择如下相应验证项目：

- a) 运输液体洁净度；
- b) 泵类系统运行效率；
- c) 活细胞密度。

6.4 验证方法

6.4.1 运输液体洁净度

按 SEMI F57-0622 的规定测试并记录工艺流程改造前、后设定运行时间（如 6 h）内运输液体的污染物浓度。运输液体洁净度的提升率按公式（2）计算，验证运输液体洁净度是否符合预期目标。

$$r_a = \frac{(C_y - C_x)}{C_y} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- r_a ——洁净度提升率；
- C_y ——改造前运输液体污染物浓度，单位为颗粒数每毫升(个/mL)；
- C_x ——改造后运输液体污染物浓度，单位为颗粒数每毫升(个/mL)。

6.4.2 泵类系统运行效率

按 GB/T 13468 中 7.6 的规定测试并计算工艺流程改造前、后的泵类系统运行效率。泵类系统运行

效率的提升率按公式（3）计算，验证泵类系统运行效率是否符合预期目标。

$$r_b = \frac{(\eta_y - \eta_x)}{\eta_x} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 r_b ——运行效率提升率；
 η_y ——改造后的泵类系统运行效率；
 η_x ——改造前的泵类系统运行效率。

6.4.3 活细胞密度（VCD）

使用符合 GB/T 42076.1 规定的自动细胞计数器等测量工具，测试并记录工艺流程改造前、后设定培养周期（如 3 天）内细胞培养液中活细胞密度。活细胞密度的提升率按公式（4）计算，验证活细胞密度是否符合预期目标。

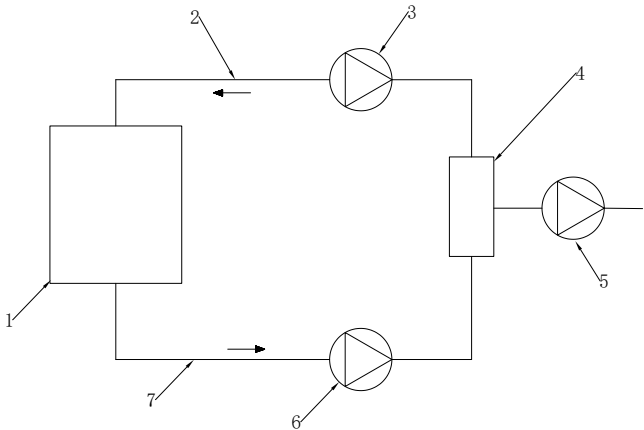
$$r_c = \frac{(v_y - v_x)}{v_y} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中：
 r_c ——活细胞密度提升率；
 v_y ——改造前的活细胞密度，单位为活细胞数每毫升(cells/mL)；
 v_x ——改造后的活细胞密度，单位为活细胞数每毫升(cells/mL)。

附录 A
(资料性)

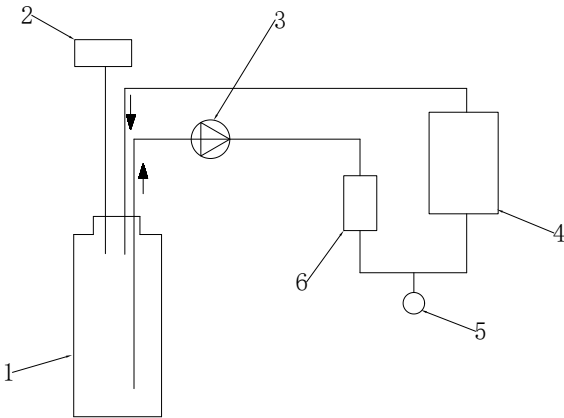
泵送系统在生物制药行业的应用示意图

泵送系统在生物制药过程中的灌流培养（细胞），深度过滤（光刻胶），液体转移（超纯水），切向流过滤（浓缩料液）等环节均有应用，各环节应用示意图分别如图 A.1～图 A.4 所示。



- 标引序号说明：
- 1——生物反应器；
 - 2——进料管路；
 - 3、6——泵送系统；
 - 4——过滤器；
 - 5——出液泵；
 - 7——反馈管路。

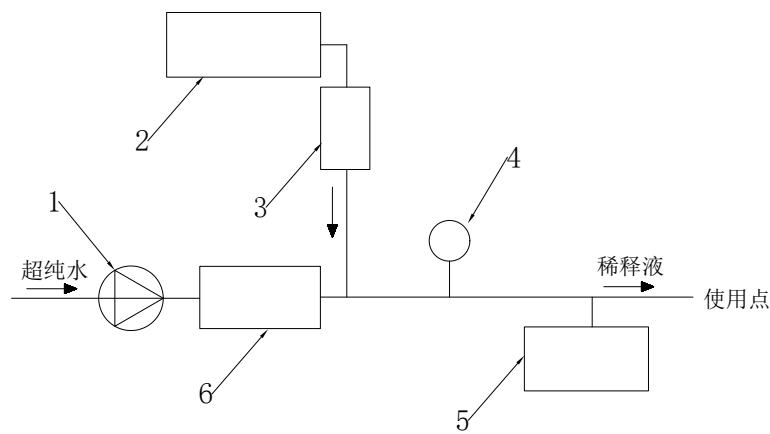
图 A.1 泵送系统在灌流培养环节应用示意图



- 标引序号说明：
- 1——混合罐；
 - 2——气体源；
 - 3——泵送系统；
 - 4——粒子计数器；
 - 5——压力表；

6——过滤器。

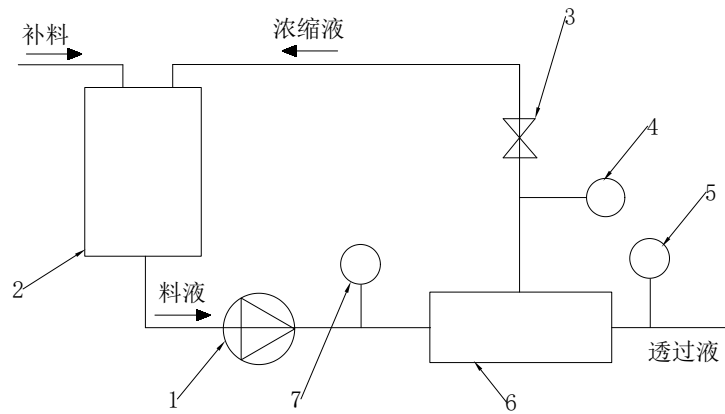
图 A.2 泵送系统在深度过滤环节应用示意图



标引序号说明:

- 1——泵送系统;
- 2——气体源;
- 3——药液罐;
- 4——压力传感器;
- 5——导电率计;
- 6——流量计。

图 A.3 泵送系统在液体转移环节应用示意图



标引序号说明:

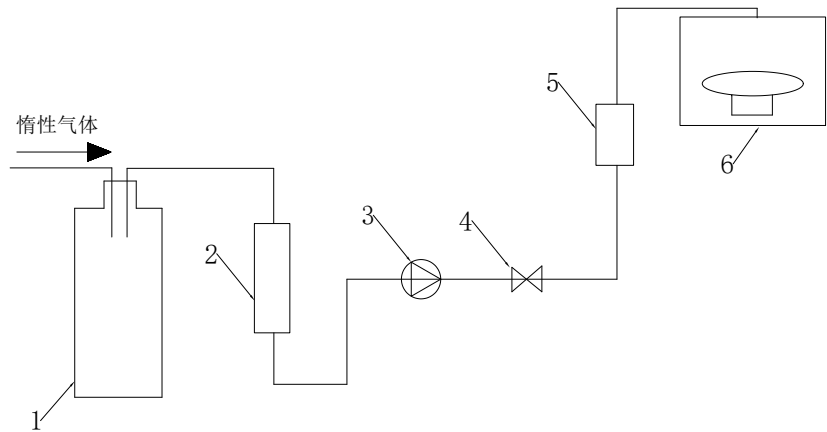
- 1——泵送系统;
- 2——料罐;
- 3——回流阀;
- 4、5、7——压力表;
- 6——过滤器。

图 A.4 泵送系统在切向流过滤环节应用示意图

附 录 B
(资料性)

泵送系统在半导体行业的应用示意图

泵送系统在半导体制程中电镀、湿法清洗、湿法刻蚀、抛光、匀胶显影等环节均有应用，各环节运输工艺液体介质（电镀液、清洗液、光刻胶、抛光浆料）的应用示意图如图 B.1 所示。



标引序号说明：

- 1——工艺罐；
- 2——滞留槽；
- 3——泵送系统；
- 4——控制阀；
- 5——过滤器；
- 6——工艺设备。

图 B.1 泵送系统在半导体工艺液体各运输环节应用示意图

参 考 文 献

- [1] 陈超.无轴承薄片离心泵的研究和实现 [D].南京：南京航空航天大学，2009.
 - [2] Schweitzer G., Maslen E. H. 磁悬浮轴承——理论、设计及旋转机械应用[M].徐旻，张凯，赵雷，译.北京：机械工业出版社，2012.
-