

真空夹具的设计与应用

王川

(山东栋梁科技设备有限公司 山东 济南 250000)

摘要:卡盘、夹爪、平口钳是自动化生产的通用夹具。对于一些夹钳式手爪难以夹持或不可采用磁力夹紧的工件,真空夹具是一种值得考虑的替代解决方案。对于形状复杂的壳体类薄壁零件、平板状工件、加工精度较高的薄壁零件,可以通过找到一组可以装夹的相对平整的平面并校核其夹紧力,设计满足工件装夹要求的真空夹具解决工件的装夹问题。因此,本文基于端拾器和CNC真空吸盘,对真空夹具的工作机理进行分析,并系统分析了真空发生装置的选型、真空回路的设计。

关键词:端拾器;CNC真空吸盘;夹紧力;响应时间;真空发生装置;真空回路

0 引言

本文结合端拾器与CNC真空吸盘两种常见的真空夹具,介绍真空夹具系统的设计选型。端拾器是机器人或机械手搬运机构的末端“夹爪”。CNC真空吸盘用于装夹通用夹具难以夹持的零件,在铣削、磨削等机械加工领域应用广泛。

真空夹具由真空发生装置、真空过滤器、压缩空气、调压过滤器、阀类控制元件(控制阀、吹气阀、节流阀)、真空压力开关、真空表、夹具本体等元件组成。

真空度、夹紧力(或称吸附力)和响应时间(即达到工作压力所需的抽气时间)是真空夹具系统设计的三个重要参数。抽气时间是检验真空夹具系统效率的主要参数。

1 真空夹具的工作原理

真空发生装置产生真空,通过阀类控制元件、真空压力开关、真空过滤器和真空夹具本体连通,将真空夹具本体与工件组成的腔室抽成相对负压真空状态。真空夹具本体与工件组成的腔室绝对压强数值 P_0 低于腔室外部的大气压强的数值 P_a , P_a-P_0 的数值就是真空腔室的真空度。在大气压强的作用下,工件被真空夹具吸附,表面形成分布均匀的压力。根据工件的受力情况,吸附力和摩擦力是真空夹具夹紧力的两种形式。

2 端拾器的设计

端拾器是由 n 个按照真空矩阵结构布置的真空吸盘、真空气路元件、型材快换骨架、快换盘、传感器等组成的末端执行装置。端拾器可用于线路板、电子产品元件等小型零部件的搬运、装配,也可用于汽车外壳、玻璃制品等大型零部件的搬运、装配、装箱作业。真空吸盘

采用橡胶材料与金属骨架压制而成,柔性高、吸附力均匀,因此采用组合式真空吸盘移动工件时,可以有效保护工件外表面,同时不会产生残余应力或磁力。

真空发生器、真空泵是两种常用的真空发生装置。本文介绍的端拾器采用较为常用的真空发生器作为真空动力源。

2.1 端拾器的设计选型计算

2.1.1 理论吸附力

当真空夹具作为搬载体使用时,真空吸盘除了需要承担工件重力,还需要支撑由加速度产生的力。本文归纳了三种典型的情况受力情况,计算理论吸附力。其他受力情况,可根据这三种情况演变。

第一种情况(图1),吸盘水平放置;工件被吸附,垂直提升的某一时间段内,提升加速度为 a 。

$$F_t = m(g+a)K_1 \tag{1}$$

第二种情况(图2),吸盘水平放置;工件被吸附,先垂直提升,垂直提升的某一时间段内,提升加速度为 a ;然后被水平搬运,水平搬运的某一时间段内加速度 a_h 。

$$F_t = \max\{m(g+a)K_1, m(g+\frac{a_h}{u})K_1\} \tag{2}$$

第三种情况(图3),吸盘垂直放置,受垂直力;工件被吸附,垂直提升的某一时间段内,提升加速度为 a 。

$$F_t = \frac{m(g+a)K_2}{u} \tag{3}$$

式中: F_t —理论吸附力(N);

m —工件质量(kg);

g —重力加速度(m/s^2),取 $g=9.8m/s^2$ 。

a, a_h —加速度(m/s^2),加速度不能准确确定时,计算时可取 $a, a_h=9.8m/s^2$,然后通过实验验证吸附的可靠性;

K_1 —安全系数,取 $K_1=2$;

K_2 - 安全系数, 取 $K_2=4$;

μ - 摩擦系数, 真空夹具与工件间的摩擦系数不是固定值, 受工件表面状况与真空夹具属性的显著影响, μ 必须通过测试来确定, 干燥的玻璃、塑料表面的 μ 值约 0.5。

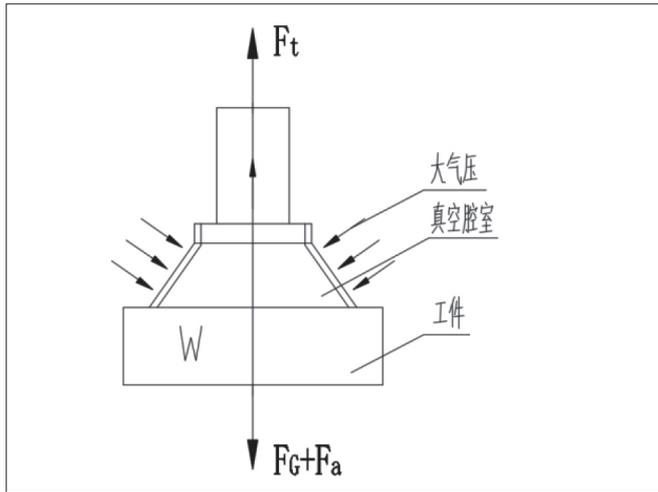


图1 水平吸附 I

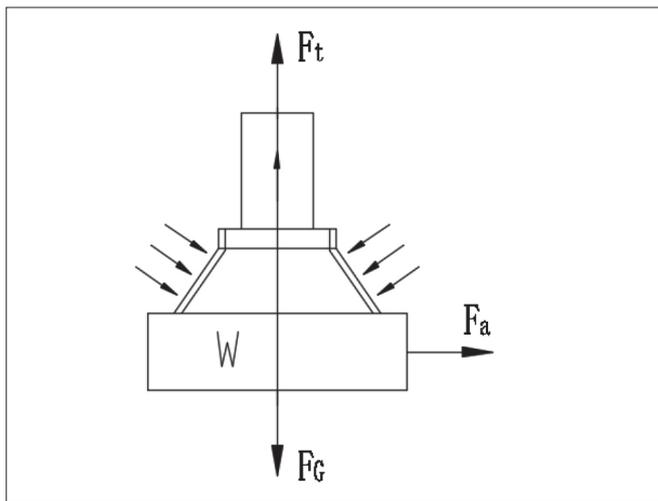


图2 水平吸附 II

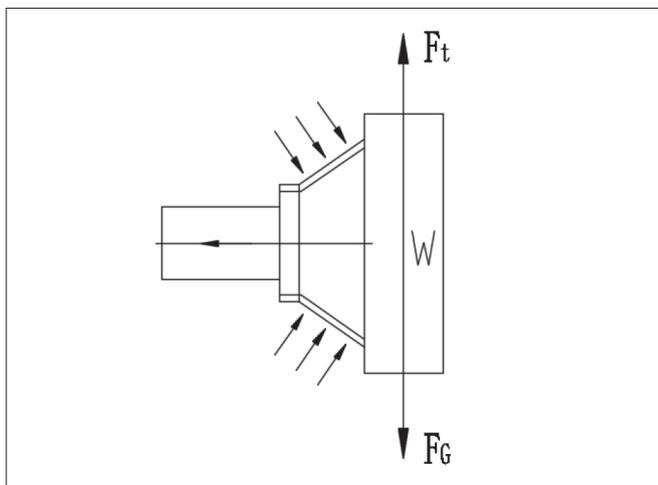


图3 垂直吸附

2.1.2 真空吸盘的选型

首先根据工件物理属性和工作环境, 选定合适的吸盘数量、材质、结构, 然后根据理论吸附力计算吸盘理论直径。根据吸盘的理论直径, 选定市场上标准型的吸盘型号。

吸盘理论直径:

$$D \geq 1000 \sqrt{\frac{4F_t}{\pi(p_a - p_0)nK_1}} \quad (4)$$

式中: n - 吸盘数量;

D - 吸盘直径 (mm)。

2.1.3 真空发生器的选型

真空吸盘腔室工艺生产所需要的工作压力 P 、响应时间 t 是真空发生器选型的两个重要参数。虽然真空发生器极限真空度 P_v 可达 -88kPa, 但是真空发生器的抽吸能力随系统真空度的升高而迅速下降, 最终趋向于零。因此, 工作真空度不能过高, 真空发生器的选型需要综合权衡最佳抽吸能力和系统效率, 一般应在 60%~90% P_v 的区间选择。响应时间 t 根据生产节拍选定, 自动化生产中一般小于 1s。

当真空系统漏气量很小, 可忽略不计时, 抽气时间可用简化公式计算。

$$t = 1.3 \frac{V_{sum}}{Q_v} \ln \frac{P_a}{P} \quad (5)$$

式中: P_a - 大气压强 (Pa);

V_{sum} - 端拾器系统各腔室总容积 (L)。

在响应时间 t 、工作压力 P 、总容积 V_{sum} 参数确定的情况下, 根据式 (5) 计算真空发生器的平均抽吸能力 Q_v , 作为选择真空发生器的依据。

由式 (5) 及真空发生器的抽吸特性曲线可知, 真空发生器工作时, 系统真空度与抽气时间大致成对数函数关系。根据真空发生器的这一特性, 引入真空发生器选型的方法。

首先计算 T_1 :

$$t = \ln \left(\frac{P_v}{P_v - (p_a - p_0)} \right) T_1 \quad (6)$$

式中: T_1 - 真空吸盘腔室压力从大气压降至真空发生器极限真空度的 63% 的抽气时间 (s);

P_v - 真空发生器的极限真空度 (Pa)。

然后确定真空发生器的最大抽吸速率:

$$Q_{vmax} = \left(\frac{60V_{sum}}{T_1} + Q_L \right) \frac{1}{C_q} = \frac{Q_v}{C_q} \quad (7)$$

式中: Q_L - 考虑泄漏时引入此参数, 取决于与工件、吸盘特征, 一般通过实验测量; 不考虑泄漏时 $Q_L=0$ (L/min);

C_q - 流阻系数, 一般取 $C_q=1/2$;

Q_v - 真空发生器的平均抽吸速率 (L/min)。

第三步, 根据最大抽吸速率, 选择真空发生器型号。然后验证选定的电磁阀的平均吸入速率 Q_p 、配管的平均吸入速率 Q_s , 使其小于选定的真空发生器的平均吸入速率。一般情况下应选择较大截面积的电磁阀和配管, 以增大管道的流导值, 减少压力损失, 从而保证真空系统的抽吸效率。

$$\max\{Q_p, Q_s\} = \max\{11.1S_p, 11.1S\} < Q_v \quad (8)$$

式中: S_p - 电磁阀的有效截面积 (mm^2);

S - 配管的有效截面积 (mm^2)。

最后, 真空发生器选型完成, 根据式 (6) 或式 (5) 计算实际响应时间 t 。

2.2 端拾器的真空回路

端拾器真空回路有两种典型形式: 端拾器的集中控制回路和端拾器的矩阵式分散控制回路, 如图 4 所示。

端拾器的集中控制回路的所有吸盘同时进行吸附或吹气动作, 有一个中央真空气源控制, 结构简单, 应用广泛。

工件搬运启动时, 控制阀接通, 吹气阀关闭, 经过调压过滤器调压、过滤的压缩空气进入真空发生器, 真空发生器产生真空, 开始抽吸, 当真空压力开关检测到系统的绝对压力值达到设定值时, 输出模拟量信号至控

制系统, 控制系统接收信号并按程序发出指令, 端拾器的机械手或机器人运载机构动作, 开始吸附作业。真空回路末端配置真空过滤器, 用于过滤抽吸过程中造成的环境中的污物, 防止真空元件堵塞或损坏。根据真空发生器的抽吸特性, 当其入口处的压力调节为 0.3 ~ 0.6MPa, 可获得较大的真空度和较大的吸入流量。

工件搬运到位时, 控制阀关闭, 吹气阀接通, 压缩空气经节流阀进入真空回路, 开始吹气, 工件迅速释放, 工件表面的杂质也在吹气过程中被吹净清理。节流阀用于调节吹气过程的速度, 根据工况调节吹气速度, 保证响应时间和工件准确就位。

端拾器的矩阵式分散控制回路选用阀岛控制抽吸和吹气过程, 每个或每组吸盘均可独立控制, 吸盘位置可根据工件形状、尺寸调整变换, 用不到的吸盘不启动, 节能高效, 在工件种类较多、吸盘数量较多的生产过程中应用广泛。阀岛控制采用总线结构, PLC 通过一根网络总线即可与阀岛通讯, 安装便捷, 控制精准无干扰, 高效安全。每个或每组吸盘的前端设计有过滤器, 防止阀岛、真空元件堵塞或损坏。

3 CNC 真空吸盘的设计

CNC 真空吸盘由真空吸盘、真空气路元件、真空发

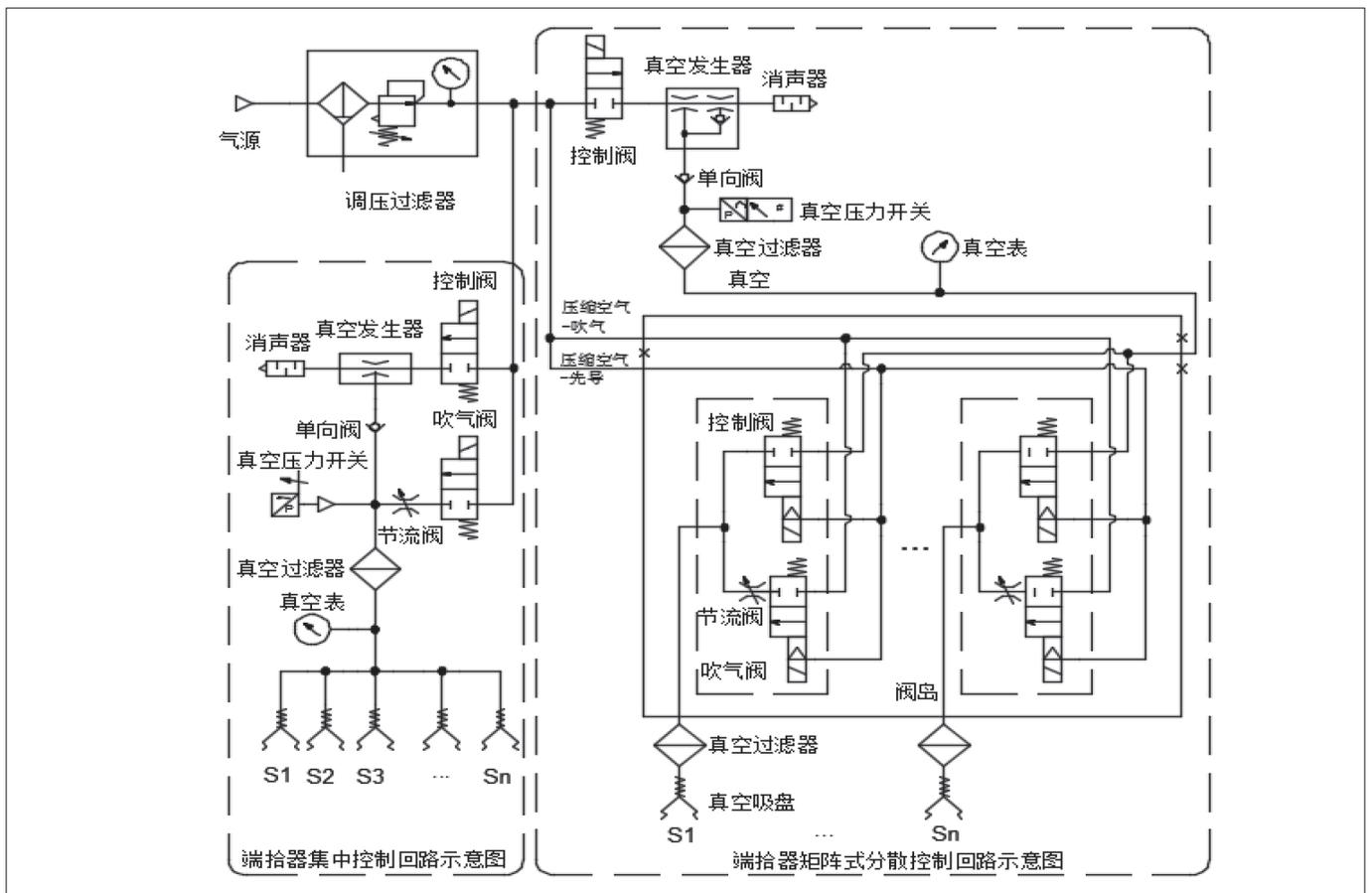


图 4 端拾器真空回路示意图

生装置、真空吸盘定位压板或零点装夹装置、定位挡板等组成。图5所示为一种CNC真空吸盘。与液压卡盘、平口钳等通用夹具相比，CNC真空吸盘能够产生的夹紧力小得多，但是真空吸盘具有装夹迅速、灵活适应工件形状、工件加工受力均匀不易变形等优点，所以它在所需切削力不大、通用夹具难夹持的加工工况，具有较大的应用价值。100mm×100mm的吸附面积，真空度0.9bar (1bar=0.1MPa)，摩擦系数等于0.2的工况下，大约可以产生180N的夹紧力平衡切削力。CNC真空吸盘多用来加工铝件、工程塑料、碳纤维、玻璃等较软的材料。

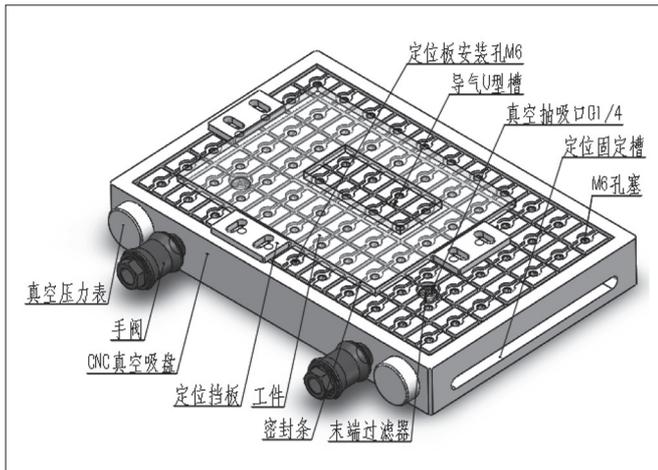


图5 一种CNC真空吸盘

密封条是常用的密封形式，使用密封条密封对工件表面质量要求不高、气密性好、真空利用率高。

依靠工件与CNC真空吸盘的接触面密封是另一种结构形式，该结构无导气槽，设计的矩阵式分散控制的n个抽吸区域，根据工件形状选择相应抽吸区域的工作状态，装夹效率高；因其结构形式导致工作过程中有一定的真空泄漏，选择真空发生装置需计算漏气量。在校核夹紧力能够平衡切削力的工况下，该结构真空吸盘可用于加工通孔。

由于CNC真空吸盘生产工况需要较高的真空度，并需要考虑一定真空泄漏，所以本文的CNC真空吸盘选用真空泵作为真空发生装置。

3.1 CNC真空吸盘的设计

设计真空夹具系统的结构、选择真空泵、控制阀等真空系统元件是真空夹具系统设计的主要内容。夹紧力、真空泵抽速和抽气时间是真空夹具系统的设计过程使用的三个重要参数。

3.1.1 理论夹紧力

理论夹紧力用以下公式计算：

$$F = (P_a - P_0) \cdot S \cdot \mu \tag{9}$$

式中：F—夹紧力 (N)；

P_a —大气压强 (P_a)，取 $P_a=105Pa$ ；

P_0 —真空夹具本体与工件组成的腔室内剩余压力 (Pa)；

S—夹具中真空腔室的有效吸附面积 (m^2)；

μ —摩擦系数，通过实验测量

3.1.2 真空泵的选型^[3]

真空泵的选型需要综合权衡多个变量之间的物理关系，首先，泵的极限真空要比真空室的极限真空高；其次，根据真空室的工作压力选择真空泵，真空室的工作压力必须位于真空泵的最优抽速度的压力区间内；最后，计算真空泵的抽速，选择真空泵。

真空泵的有效抽速：

$$S = \frac{Q}{p} \tag{10}$$

真空泵的抽速：

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{U} \tag{11}$$

式中：S—真空泵的有效抽吸能力 (L/s)；

S_p —真空泵的理论抽吸能力 (L/s)；

Q—真空系统工作时总耗气量，包括真空室工作过程中的抽吸量、真空室的漏气量、真空室及真空元件的放气量三部分 ($Pa \cdot L/s$)；

p—经过t时间的抽吸后真空腔室内达到的绝对压力 (Pa)；

U—管道的流导 (L/s)。

3.1.3 计算抽气时间

真空腔室内所能达到的极限绝对压力：

$$P_{limit} = \frac{Q_0}{S} \tag{12}$$

抽气时间的理论计算：

$$t = 2.9 \frac{V_{sum}}{S} \lg \frac{P_a - P_{limit}}{p - P_{limit}} \tag{13}$$

式中：t—抽气时间 (s)；

V_{sum} —真空夹具系统各腔室总容积 (L)；

P_{limit} —真空腔室内所能达到的极限绝对压力 (Pa)；

Q_0 —空载时，经过长期抽吸，真空腔室内的压力达到均衡稳定状态时，真空腔室的气体负荷 ($Pa \cdot L/s$)，该气体负荷是由真空夹具系统漏气、工件和管道等的材料表面出气形成的。

由式(11)可知，有效抽吸能力受到管道流导的限制，为了提高真空泵的效率，真空夹具系统的管道和控制阀等应该选择较大的有效截面积，该有效截面积应不小于真空泵入口处的截面积。真空泵与真空夹具抽吸口之间的距离尽可能的短，这样既能减小延程压力损失以增大管道流导，又能减小真空夹具系统的各腔室总容积以缩短抽气时间。

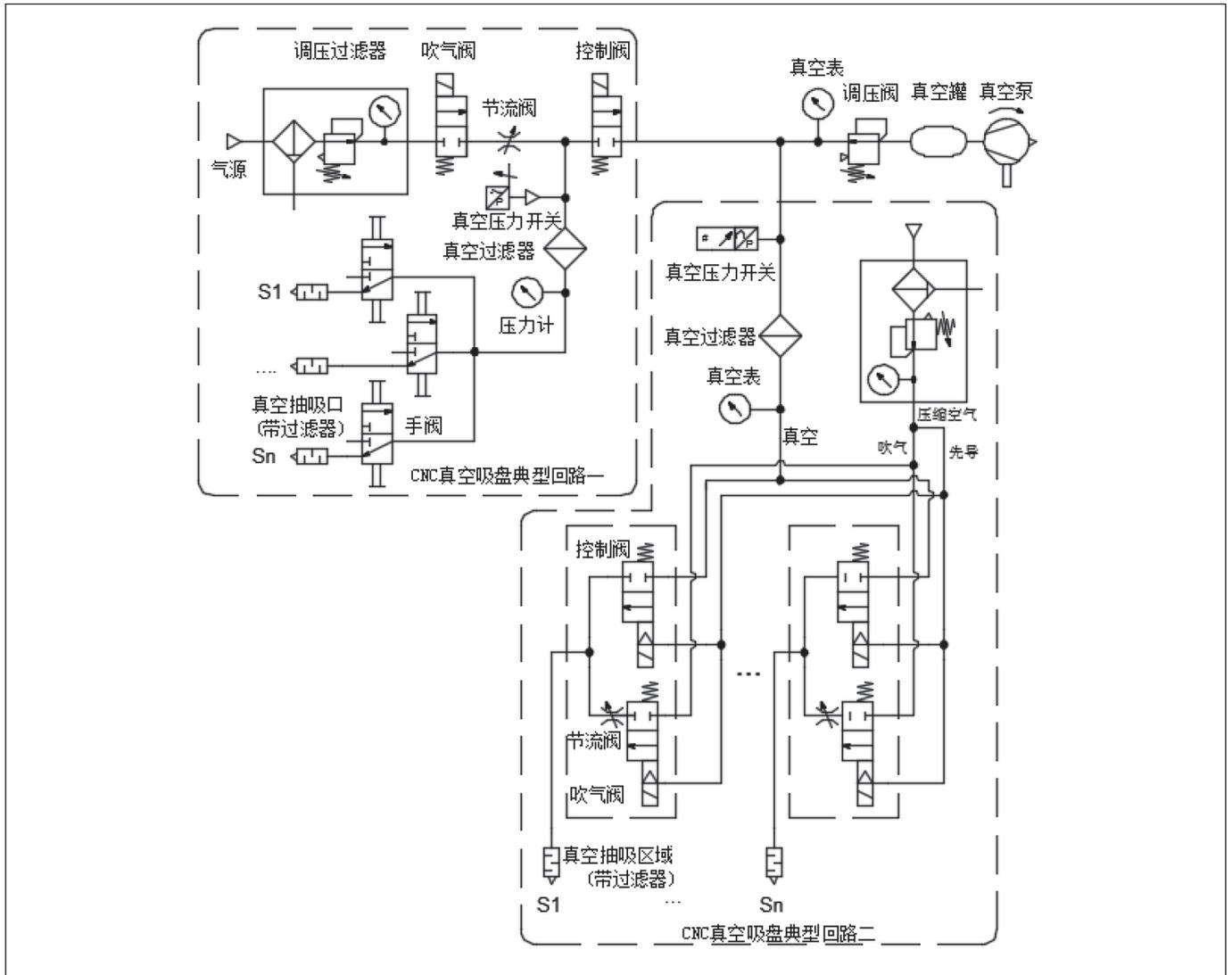


图6 CNC真空吸盘的真空回路

3.2 真空回路

CNC真空吸盘有两种典型的回路，回路原理图如图6所示。

CNC真空吸盘典型回路一：抽气和吹气过程采用集中控制的方式进行，在末端真空抽吸口配置手阀，用于控制相应的真空抽吸口通断，真空抽吸口末端安装过滤器，保护真空回路不堵塞，该回路多用于真空吸盘的真空抽吸口不多的半自动化生产。

CNC真空吸盘典型回路二：采用集中供气、分散控制的方式展开，CNC真空吸盘设计成n个区域，一个通电电磁阀控制一个区域，根据工件形状设计工作程序，控制真空吸盘相应区域的启动或关闭，保障抽吸效率。该回路主要用于真空抽吸口数量较多的自动化生产。

4 结语

本文基于端拾器和CNC真空吸盘，系统分析了真空夹具的工作机理、真空发生装置的选型、真空回路的

设计。理论计算是真空夹具设计的基石，有效的真空度、可靠的夹紧力、满足生产节拍需求的响应时间（抽气时间）是设计高质量、高效率真空夹具的基础。

随着研究的深入，基于真空夹具的设计理论，真空夹具的设计制造正呈现出百花齐放的态势，在工业生产中取得广泛的应用。

参考文献：

- [1] 成大先. 机械设计手册：第五卷[M]. 5版. 北京：化学工业出版社，2008.
- [2] SMC（中国）有限公司. 现代实用气动技术：第3版[M]. 北京：机械工业出版社，2008.
- [3] 达道安. 真空设计手册：第三版[M]. 北京：国防工业出版社，2004.

作者简介：王川（1986.11-），男，汉族，山东济宁人，本科，工程师，研究方向：机械设计、智能制造和自动化。