

北京航空航天大学

第 21 届“冯如杯”创意大
赛参赛论文

使用仿生吸附材料的太空出舱装置

北京航空航天大学

二〇一二年三月 制

摘要

本文介绍了使用仿生吸附材料制作太空出舱装置的技术设想。仿生吸附材料是一种模仿壁虎爬墙原理的纳米技术新型材料，利用细小绒毛与接触面的范德华力来提供足够的摩擦力。使用此材料制作的太空出舱装置使宇航员在出舱后能在舱体表面自由移动，工作时保证宇航员相对于舱体表面静止且不脱离舱体，大大减小了宇航员太空出舱的危险。将装置中的一些部件进行改装后可以应用到更广泛的领域中。

关键词：仿生吸附材料，太空出舱装置，壁虎爬墙原理，范德华力

目录

摘要.....	2
引言.....	2
1.模仿壁虎爬墙原理制成的仿生吸附材料	4
1.1 范德华力	4
1.2 壁虎爬墙原理：细小纤毛通过范德华力产生“吸力”	4
1.3 根据范德华力的吸附原理制成仿生吸附材料.....	4
2. 太空出舱装置.....	5
2.1 使用仿生吸附材料实现太空出舱	5
2.2 装置结构及功能.....	6
3.运动平板实现运动功能.....	6
3.1 运动原理	7
3.2 锁死原理	8
3.3 转轴轮带布局	8
4.控制手套实现移动信息的采集	9
4.1 压敏装置采集运动锁死信号	10
4.2 电容式感应点采集移动信号	10
5.处理器实现信息处理判断功能	11
6.现状与应用前景分析	13
6.1 仿生吸附材料发展现状	13
6.2 太空出舱现状	14
6.3 应用前景分析	14
参考文献:	15

图标目录

图 1- 1..... 4

图 2- 1..... 6

图 3- 1..... 7

图 3- 2..... 7

图 3- 3..... 7

图 3- 4..... 8

图 3- 5..... 8

图 3- 6..... 9

图 3- 7..... 9

图 4- 1..... 10

图 4- 2..... 10

图 4- 3..... 11

图 4- 4..... 11

图 4- 5..... 11

图 5- 1..... 12

表 1- 1..... 5

引言

➤ 创意来源：

2008 年 9 月 25 日神州七号发射升空，这次飞行的最大亮点在于航天员的“太空行走”，或称“出舱活动”。不过，对航天员来说，太空出舱不仅是重要的科研活动，更是前所未有的新风险和新挑战。出舱活动的难点主要在太空环境恶劣、出舱航天服设计两个方面。在现实生活中，壁虎能在垂直墙面上自由爬行。如果宇航员能像壁虎一样在太空舱或空间站表面自由行动而不会脱离舱体，那么出舱活动的安全性将大大提高。

➤ 仿生吸附材料：

壁虎脚上的刚毛有开叉的末端，每根刚毛都分成了 100-1000 根更细的绒毛，这些细小纤毛和墙壁之间产生范德华力，使壁虎能在光滑墙面自由爬动。范德华力不会受到真空，微重力的影响，所以如果使用纳米技术和新型材料制成仿壁虎脚掌的吸附材料，将会在航天等领域发挥重要的作用。

这种材料有以下几个优点：

1. 对环境的选择性小，真空、微重力、高压等极端条件下吸附性能依然不会改变。
2. 单位面积产生的吸附力大。
3. 可重复使用，并且重复使用时吸附性能不会受影响，在从墙面剥离时，不会吸附细小灰尘。

➤ 太空出舱装置：

使用仿生吸附材料的太空出舱装置，从结构上分为运动平板和控制手套两个部分，从功能上分为移动信息采集模块（控制手套实现），信息处理判断模块（处理器实现），运动模块（运动平板实现）。该装置的主要功能为：宇航员可以自由在船舱或空间站表面自由移动，而不和船舱脱离；宇航员需要工作时，可保证宇航员相对于船舱静止，并且可以空出双手进行工作。

该装置的优点如下：运动模块的自动锁死功能使宇航员不必担心在移动过程

中操作失误造成错误移动或脱离舱体表面；移动信息采集模块使用的感应片区，当感应片区的不同感应点采集到的移动信息达到一定相似度时，运动平板才做出相应运动，增加了运动功能的可靠性；信息处理判断模块的个人适应功能，提高了装置针对不同使用者的适应性，同时提高了运动功能的灵敏性。

1. 模仿壁虎爬墙原理制成的仿生吸附材料

1.1 范德华力

分子间作用力，又被称为范德华力，按其本质来说是一种电性的吸引力，但比化学键弱得多。因此考察分子间作用力的起源就得研究物质分子的电性及分子结构，是一种作用能与距离的六次方成反比的短程力，不受微粒之间的方向与个数的限制。普遍存在于固、液、气态任何微粒之间，与距离六次方成反比。

1.2 壁虎爬墙原理：细小纤毛通过范德华力产生“吸力”

壁虎为什么可以在高光滑度的墙面自由爬动？1965 年，来自美国加州大学河滨分校的生物学家瑞宝（Rodolfo Ruibal）把壁虎脚放在了电子显微镜下，他发现那些看似小钩子一样的刚毛末端，实际上是开叉的，每根刚毛都分成了 100-1000 根更细的绒毛，这些绒毛极大的增加了壁虎脚掌的面积，特别是当壁虎攀在那些粗糙的物体表面时，这些绒毛更能填满那些细小的坑洼（如图 1-1）。通过这些细小纤毛和墙壁之前的范德华力的作用，虽然范德华力的大小很小，但是壁虎脚掌绒毛的数量是非常庞大的，所以一个脚掌产生的范德华力很大，所以壁虎能轻松在垂直光滑墙面上“吸”住。

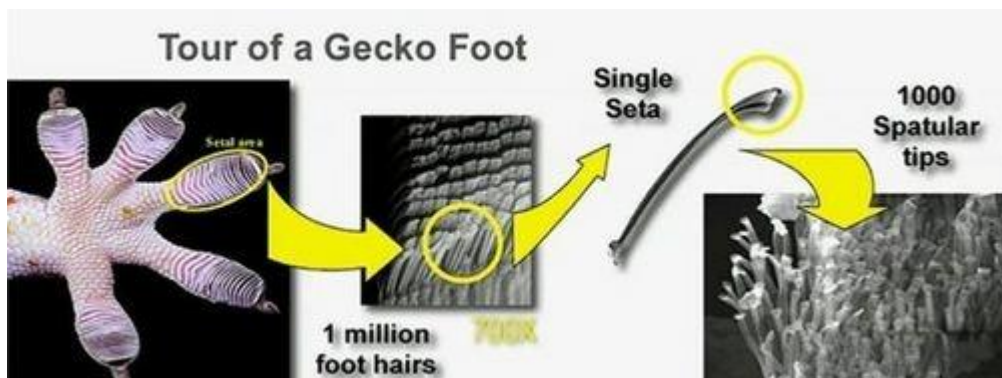


图 1-1

1.3 根据范德华力的吸附原理制成仿生吸附材料

如果使用纳米技术和新型材料制成仿壁虎脚掌的吸附材料。这种吸附材料和目前现有的粘合剂或吸附材料相比有很大的优点。首先，在真空中可以使用。真

空中分子间作用力不会受任何影响，所以真空环境不会影响该材料的吸附能力。第二，可重复使用。吸附材料即使和接触面分离，再次接触时，范德华力依然可以产生，所以其吸附性能不会改变。第三，不受细小灰尘的影响。壁虎脚掌刚毛上的绒毛尺寸比灰尘小得多，以至于这些绒毛对灰尘的吸附力不及灰尘与墙面的吸附力，所以壁虎在抬脚时并不会粘走灰尘。同样的原理，当将吸附材料与接触面分离时，也不会粘住灰尘。当吸附材料与接触面分离时，也不会粘住灰尘。第四，单位面积的产生的吸附力大。世界上体型最大的壁虎——蛤蚧，成年体长近 40 厘米，重近 300 克。经过测量，蛤蚧每个脚掌的面积大约是 227 平方毫米，共长着 3268800 根刚毛，总共可以产生约 20 牛顿的吸附力，而它的重力只有大概 3 牛顿。经过计算每平方米仿生吸附材料能产生 20000N 以上的吸附力。（如表 1-1）

选项(单位)	数据
每个脚掌面积(mm ²)	227
每个脚掌产生吸附力(N)	5
载重率(N/m ²)	22026
使用材料面积(m ²)	载重率×载重力

表 1- 1

2. 太空出舱装置

2.1 使用仿生吸附材料实现太空出舱

如果在地球让一个人能像壁虎那样爬在垂直于地面的光滑墙面上，按照制成表 1.1 中同样吸附力的仿生吸附材料，产生的吸附力约为每平方米 22026 牛。所以让一个负重后 150kg 的人飞檐走壁，需要 0.07 m² 的仿生吸附材料。与此相比，太空中宇航员处于失重条件，受重力影响很小。所以制成让宇航员贴在太空舱或空间站表面的需要的太空出舱装置需要的仿生吸附材料更少。

2.2 装置结构及功能

太空出舱装置从结构上分为运动平板和控制手套两个部分，从功能上分为移动信息采集模块（控制手套实现），信息处理判断模块（处理器实现），运动模块（运动平板实现）。运动平板使用较大的接触面的仿生吸附材料提供主要吸附力，并且通过履带和轮轴进行移动。运动平板安置在宇航服的腹部，宇航员可利用平板附着在舱体或空间站表面，同时空出双手，灵活进行其他工作。

手套在手掌表面使用少量仿生吸附材料，并安装感应装置传出电信号。压敏装置测出装置运动或锁死的信号，电容式感应点测出装置位移的信号。通过有线或无线传输信号到处理器，经处理器处理，实现手套对运动平板的控制，一方面通过控制运动平板的移动方向，使用者在移动时不必消耗过多的体力；另一方面通过控制运动平板的运动和锁死，增加了使用的安全性。使用状态如图（2-1）。

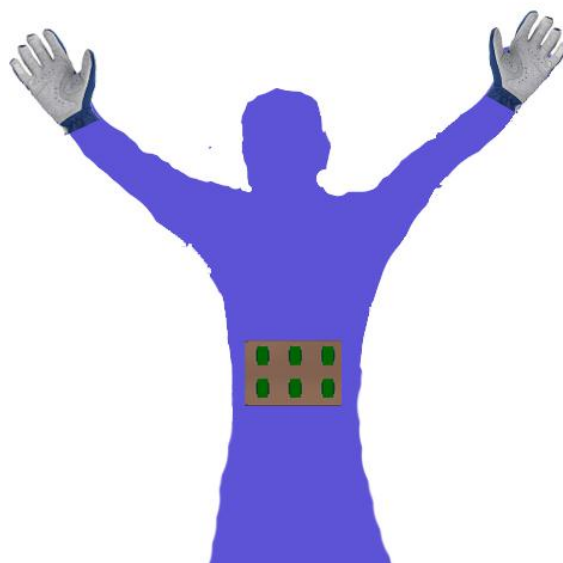


图 2-1

3.运动平板实现运动功能

运动平板由平板和数个转轴轮带组成。使用者戴上腰带，将平板固定于腰带，转轴轮带分布在平板上。转轴轮带实现运动平板的运动和静止，并且通过不同的布局实现应用于不同的地形和环境。转轴轮带为运动平板的基本单元，如图 3-1 所示，绿色的部分为履带，其表面由仿生吸附材料制成，靠内部的轮轴转动带动其转动。蓝色部分为支架，用于连接底座和转轴。紫色的部分为转轴，用于控制

转轴轮带的转向。

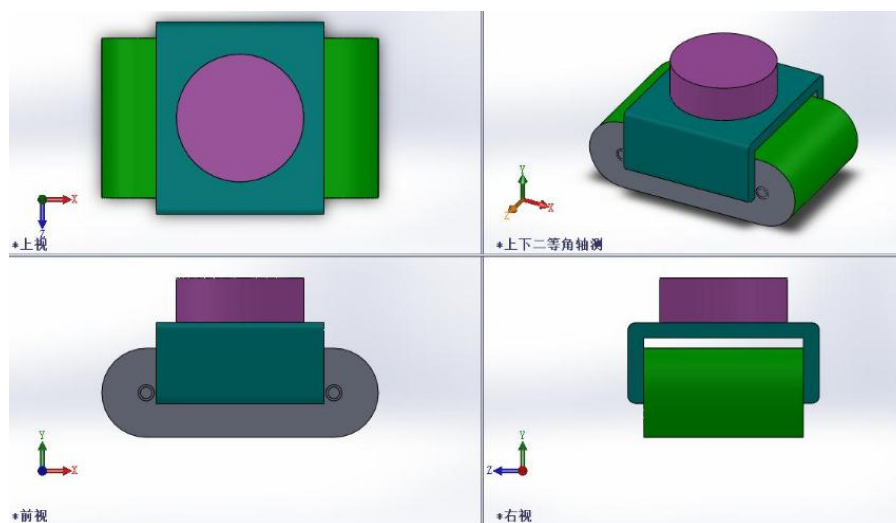


图 3-1

3.1 运动原理

首先，壁虎是怎样拔脚的？既然它的脚可以产生这么大的吸附力，壁虎又是怎样做到收放自如的呢？通过高速摄像机，科学家们观察到壁虎每次拔脚都是从向上卷曲趾尖开始的，相当于先揭开一角。从弯曲趾尖到整个脚脱离平面，只用短短的 15 毫秒。（如图 3-2）



壁虎趾尖向上卷曲示意图

图 3-2

履带在转动时，前端与接触面的分离，如同壁虎拔脚是卷曲趾尖一样，不需要太大的力就可以让其运动，同时履带后端与接触面接触，保证了有效吸附面积不变。这样腰部吸盘在运动时，吸附力依然不变。电动机带动履带转动，通过控制电流的大小和方向，实现轮带的转速和转动方向的不同。转向时，控制转轴转动，保持了人相对于环境的方向不变。（如图 3-3）

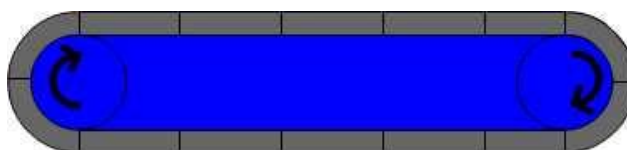


图 3-3

3.2 锁死原理

转轴轮带的锁死装置使用电磁铁和仿生吸附材料制成轮轴和转轴的锁死机构。如图 3-4、图 3-5 所示,使用仿生吸附材料制成弹性鼓膜,当鼓膜和轴接触时,仿生吸附材料贴住轴, 提供很大的静摩擦力, 使其无法转动。

锁死状态下, 电磁铁不通电, 弹簧处于轻微伸长状态, 保证仿生吸附材料紧紧贴住轴。给电磁铁通电后, 通电螺线管由于电磁阻尼, 电磁铁的磁力缓缓增大, 电磁铁缓缓吸住衔铁, 鼓膜和轴缓缓分离。完全分离后, 轴可自由转动, 解开锁死状态。由于轴与鼓膜的接触面为圆面, 所以二者分离时, 遵循壁虎拔脚的原理, 所以其分离不需要很大的外力。根据电磁铁通电时的电磁阻尼作用, 使装置从锁死状态变成解开锁死状态有一个时间缓冲。进入解开锁死状态后, 弹簧伸长量增大, 给电磁铁断电同时停止轮轴和转轴的驱动, 较大的弹力使装置很快从解开锁死状态回复为锁死状态。锁死轮轴和转轴后, 转轴轮带就不会和接触面发生相对位移, 使用者就可以完全静止于环境。

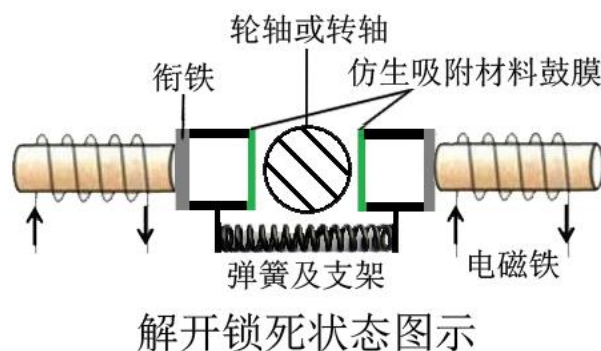


图 3-4

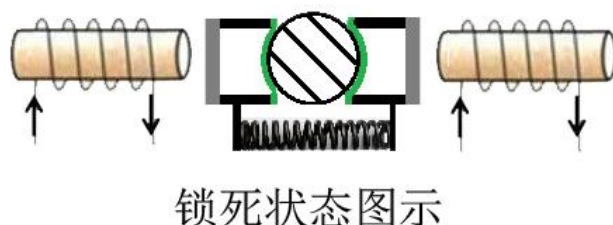


图 3-5

3.3 转轴轮带布局

可根据实际需要的不同, 制造不同有效吸附面积的转轴轮带。从 2.1 中的计

算可知，载重 150kg 需要 0.07 m² 的仿生吸附材料。一共 6 个转轴轮带，每个的接触面大小可设计为 0.1m×0.12m，这样仅靠腰部吸盘就可以承载重量。在转弯时，一方面转轴转动，转轴轮带的前进方向改变；另一方面，控制每个转轴轮带的速度不同，实现差速转向。（如图 3-6、图 3-7）

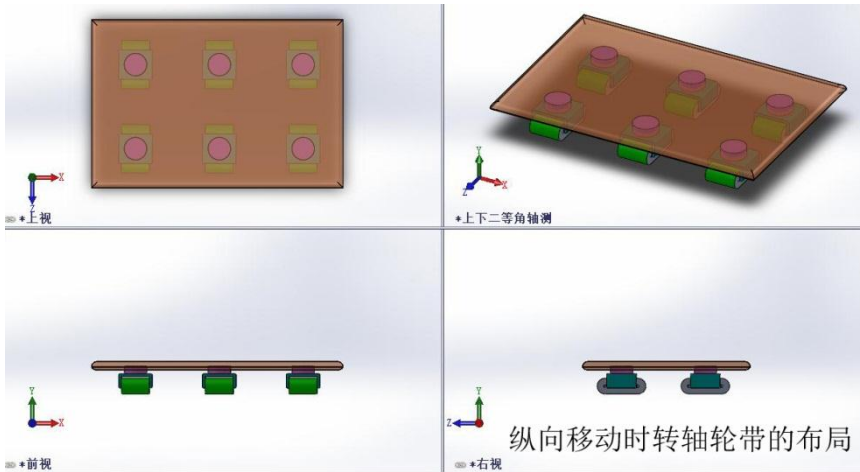


图 3- 6

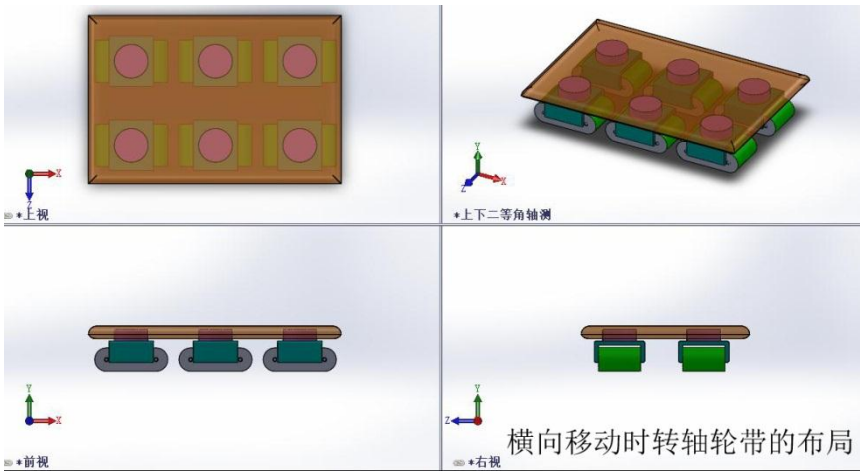


图 3- 7

4.控制手套实现移动信息的采集

控制手套通过压敏装置和电容式感应点对使用者所需的运动进行测量，并将信号输入处理器，从而实现其对运动平板的控制。手套表面采用少量仿生吸附材料，并在手套上加装感应装置，感应点均匀分布在感应片区(图 4-1 中蓝色部分)。每个感应点由两个电容式感应点和一个压敏装置构成。两个电容式感应点分别测出 X，Y 方向的位移，记为 x_i , y_i ；压敏装置测出该感应点所受压力 F_i 。



图 4-1

4.1 压敏装置采集运动锁死信号

压敏装置（如图 4-2）使用压敏电阻，当手套压在接触面上时，施于压敏电阻上的压力变化，压敏电阻的电阻值变化，通过电路输出电信号。经过计算得到压力大小 F_i 。

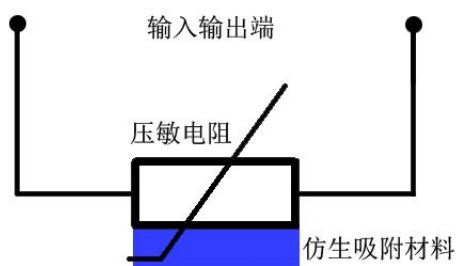


图 4-2

4.2 电容式感应点采集移动信号

在手套的不同部位安装电容式感应点，其结构如图所示。A 极板分为三个部分：主极板、上边缘极板、下边缘极板，B 极板和仿生吸附材料直接相连（如下图所示 4-3）。A 极板和 B 极板间有空隙。B 极板分别和 A 极板的三个部分构成三个电容器。手套接触平面时，需要向某方向移动，双手拉动（如图 4-4），电容式感应点中 A 极板和 B 极板产生相对位移 Δy 。（如图 4-5）三个电容器的正对面积就会改变，电容大小变化。对于主极板与 B 极板构成的电容器来说，仅有 Δy 会影响电容的大小，通过计算可以输出 y 方向移动的量。对于上、下边缘极板和 B

极板构成的两个电容器来说，电容值变化量有所不同，电容变化大的边缘电容即为 B 极板的移动方向，这样就可以输出向 y 轴的正向或负方向移动的信号。

通过以上电容装置可以测出一个轴向的位移。使用两个相互垂直的这种电容装置，就可以获得 X, Y 方向的位移 x_i, y_i ，再通过处理器控制，实现运动平板的移动。

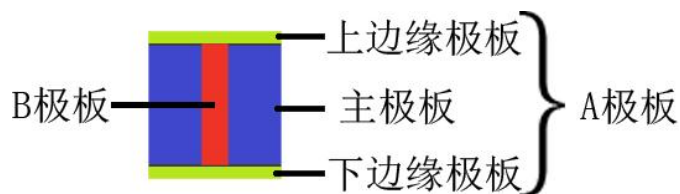


图 4-3

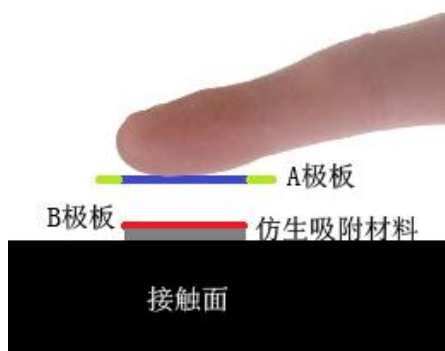


图 4-4

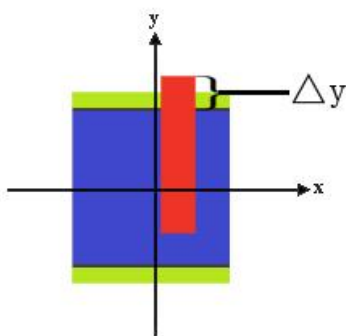


图 4-5

5. 处理器实现信息处理判断功能

控制手套收集了运动、锁死和运动方向等信号后，传入处理器处理判断，控制运动平板的运动，并且实现一些功能。考虑到人用手施力时，不同区域的力的大小不同，并且手套直接接触的平面也不一定平整，所以使用感应片区，并且装置使用前进行试用调试。

使用装置前，宇航员先戴上控制手套在安全的非工作环境模拟出舱状态。这时，每个感应点将输出 F_i ，计算 $F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$ (n 为感应点的个数)，处理器通过 $F_i \geq \mu F$ ($0 \leq \mu \leq 1$ ，根据实际情况调节 μ 的值) 判断出每个感应点是否为有效感应点。使用装置时，系统仅使用有效感应点测出数据控制装置。具体控制流程如图 5-1。

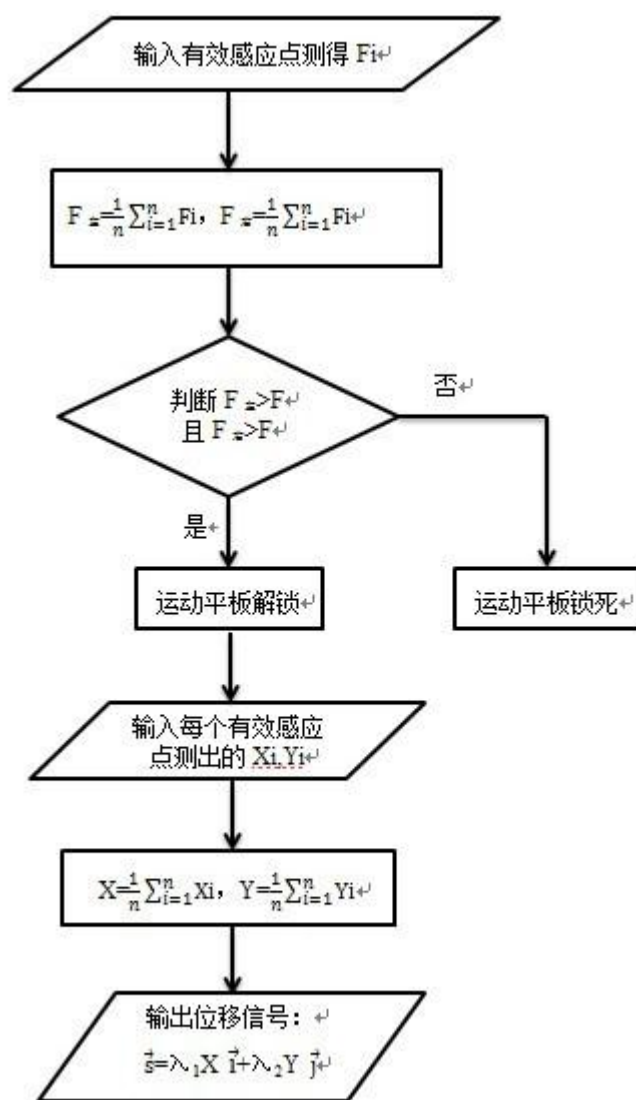


图 5-1

处理器按照流程图工作，装置可以实现以下功能。

- 1、需要进行其他工作时，双手离开舱体表面，装置将保证宇航员相对于舱体静止。
- 2、多个感应点测出数据，使输出的移动信号可靠性很高。
- 3、通过调节 μ 、 λ_1 和 λ_2 的值，可以改变太空出舱装置运动的灵敏度，以

适应不同的环境。

4、有效感应点的判断，保证了不同使用者正常，灵活地使用装置。

5、运动过程中，若使用者不小心一只手脱离舱体，运动平板将自动锁死，保证了使用者的安全。

6.现状与应用前景分析

6.1 仿生吸附材料发展现状

2001 年，美俄两国科学家共同开始研发“壁虎胶带”，这是胶带史上的一次革命，因为这种胶带是真正的“不湿胶”胶带，也就是所谓的干性粘接。2003 年，成品问世，这是一种甚至动用了可以操纵单颗原子运动的原子力显微镜在内的各种精密仪器生产出来的胶带。半个指甲盖那么大一点就可以把一只蜘蛛侠玩偶粘在天花板上。但是，与壁虎相比，它的粘性还太低，寿命也太短。更关键的是，这玩意儿奇贵无比，经过计算，制造能粘住一个人重量的壁虎胶带，需要花费 100 万美金。

2005 年，美国的一组科学家用碳纳米管模拟了壁虎刚毛的结构，这种碳纳米管胶带的粘性甚至大于天然的壁虎脚。问题依然是，材料过于脆弱，几乎无法重复使用，并且还是太贵。

至于壁虎手套，那自然是没有问题。前面我们说了，蛤蚧几乎是用范德华力爬墙的最重的动物。而壁虎手套产生的粘性与手套的面积成正比，而它需要克服的重力则与物体的体积成正比。拿人与蛤蚧相比，人手掌的面积大约是蛤蚧前脚掌面积的 70 倍，而体重则是蛤蚧的 200 多倍。还要考虑到人的脚没有蛤蚧脚灵活，不太好布置一副脚套。因此人的“壁虎手套”面积应该比手掌大五六倍才能如蛤蚧般牢靠。

事实上，在现实生活中已经有地球人利用壁虎手套爬墙了。2008 年，业余攀岩爱好者沃林斯基小姐（Lynn Verinsky）用罗伯特福教授设计的“壁虎手套”——实际上是“壁虎板子”成功爬了一段垂直的墙壁。

6.2 太空出舱现状

目前出舱活动主要用于组装国际空间站 ISS 从 1998 年 11 月到 2006 年年底国际空间站的组装工作预计需要进行 160 次出舱活动航天员在舱外停留时间共约 960h 平均每年为 125h 在 2006 年国际空间站投入使用后对其进行经常性的保养和维修平均每年还需要进行 138h 的出舱活动。

神七运用的太空出舱技术是用叫做电脐带的细绳与飞船相连,除保证宇航员不会与飞船脱离外,宇航员在舱外的各种生理参数也是通过这两根细绳不断的传到地面。

6.3 应用前景分析

仿生吸附材料可用于各种特殊环境下的连接,比如真空环境和高光滑的表面。该材料将在未来的航空航天领域发挥重要作用。从 3.2 中的轮轴锁死装置可知,该材料可用于刹车和减速装置。该材料在接触式测控方面有很大的应用前景,如 4.2 中的电容式感应点稍作改造即可制成接触式相对位移测量器。

该装置可广泛用于航天领域,尤其可应用于太空出舱作业,把运动平板安置在宇航服的腹部,宇航员可利用平板附着在舱体或空间站表面,同时双手可以灵活进行其他工作。

运动平板经过改造,在平板上加装各种仪器或测控装置,通过人工遥控操作平板的运动。可进行探测苛刻环境、高空拍摄、高楼外墙的维修和清洁、空间站和宇宙飞船的外部维护和测控等工作。

手套经过改造可用于极限运动爱好者,它不仅是攀岩爱好者的得力助手,也可以适用于各种光滑垂直的玻璃墙,让使用者像蜘蛛侠一样飞檐走壁。

参考文献：

- [1] 【国际太空】 2003 年4 月号《太空出舱活动的生理和工效问题》 吴国兴
- [2] 【科学中国人】 2009 (2) 出舱活动与舱外航天服 李潭秋