

# 动作经济性原则在焊钳动作优化中的应用

陈冠璋, 吴迪冲<sup>2</sup>, 李仁旺<sup>1</sup>, 莫灿林<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江财经大学, 杭州 310018)

**摘要:** 针对中小汽车焊装厂焊钳动作方法存在的问题, 提出将动作经济性原则运用于焊钳动作优化中。基于对焊钳运动原理和焊钳动作特点的分析, 提出了焊钳动作经济五原则: 分工原则、就近原则、双手均衡原则、助力原则和适配原则。通过剖析某汽车焊装厂典型工位实际案例, 对上述原则进行了验证。实践证明焊钳动作经济五原则能够有效提高企业的生产效率。

**关键词:** 动作经济性原则; 焊钳动作经济五原则; 焊钳运动原理

**中图分类号:** TG441.4      **文献标志码:** A

## 0 引言

动作经济性原则是在动素研究的基础上从作业中找出不符合动作经济性原则之处, 通过核查动作方法、作业现场布置、使用的工具设备等, 来把握动作改善的要点。工业工程先驱泰勒和弗兰克·吉尔布雷斯夫妇对动作 IE 领域进行过深入的研究, 创立了动作研究学科, 并提出了动作经济性原则。吉尔布雷斯给出动作经济性原则的定义是“人为了以最低限的劳动获得最高的效率, 寻求最合理的作业动作时应该遵循的原则。根据这些原则, 任何人都能检查作业动作是否合理。”<sup>[1]</sup> 在此基础上经过其他学者的进一步提炼, 总结出四条基本动作经济原则: 1) 减少动作数; 2) 双手同时动作; 3) 缩短动作距离; 4) 轻快动作, 并分别从动作方法、作业场所、工夹具与机器三个方面实施优化<sup>[2]</sup>。本文以某汽车焊装厂焊钳操作方法为研究对象, 调查分析焊钳动作中不足之处, 并将动作经济性原则与焊钳动作优化相结合, 探讨焊钳动作经济性原则。该原则可供以手持式电阻点焊钳为主要加工方式的中小汽车焊装厂和摩托车厂参考。

## 1 焊钳运动原理和动作特点

手持式气动点焊钳是中小汽车焊装厂使用最广泛、品种最多样的焊接设备。它通过气压传动对钣金件施加压力, 利用电流通过钣金接触面所产生的电阻热进行焊接。在焊装自动化程度较高的企业, 焊钳一般安置在机器人手臂上, 由计算机程序控制机器人进行焊接作业。而在自动化程度较低的企业, 焊钳则是以绳索吊挂、人工牵引的方式进行焊接作业。对于中小企业来说, 选择成本低廉的手持式点焊钳进行批量生产, 是其降低成本的主要手段之一。据统计, 一辆紧凑型轿车的白车身骨架上共有 4 000~6 000 个电阻焊点, 其中 90% 以上的焊点是由手持焊钳的工人完成的。由此不难推测焊钳使用的舒适性将直接影响到单元工位乃至车间整体的生产效率。为了探究手持式点焊钳更为高效的作业方法, 以下先对焊钳的运动原理及其动作的特点进行分析。

### 1.1 手持式点焊钳运动的原理

一个刚体在空间中完全不加约束, 那么它可以在 3 个正交方向上平动, 还可以以 3 个正交方向为轴进行转动, 那么就有 6 个自由度<sup>[3]</sup>。如图 1 所示,

收稿日期: 2013-04-12

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Z6090572, Y6110568)

作者简介: 陈冠璋(1988-), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 研究方向为 IE 工业工程现场管理。

通信作者: 李仁旺, 电子邮箱: renwangli@zstu.edu.cn

现将各方向运动名称定义如下：绕 X 轴顺时或逆时转动称为“俯仰”；绕 Y 轴转动称为“扭转”；绕 Z 轴转动称为“偏转”。3 个转动自由度的运动示意图如图 2 所示。实际上焊钳所有的姿态变化都是 3 个基本转动动作的组合，两个转动自由度是俯仰和偏转的组合，3 个转动自由度是俯仰、偏转和扭转的组合。分析焊钳的运动规律就从 3 个转动自由度入手，将复杂的焊钳姿态分解成基本动作，定量地测量角度和力，进而对焊钳动作的合理性进行科学地分析。

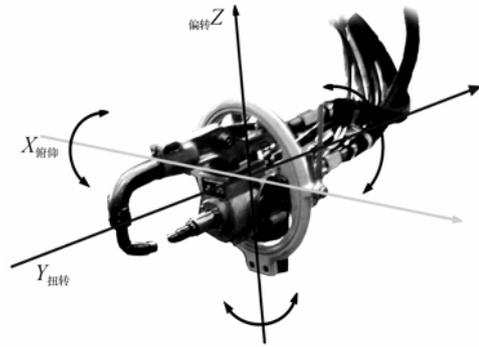


图 1 焊钳转动自由度定义

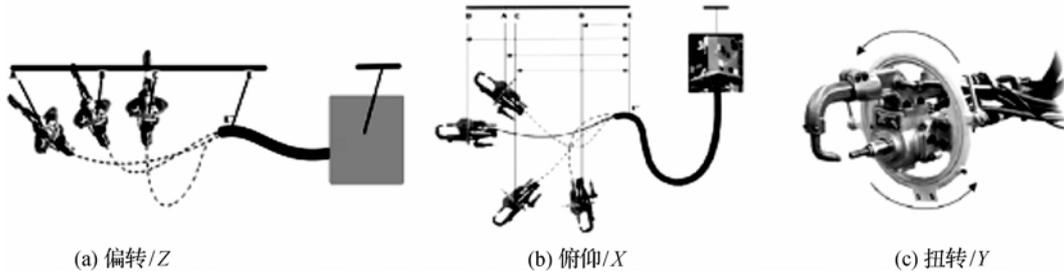


图 2 焊钳运动示意图

### 1.2 手持式点焊钳动作特点分析

吉尔布雷斯夫妇的 18 种动作要素中 3 个最核心的动素是装配、拆卸和使用<sup>[4]</sup>。这 3 个动素基本上概括了单元工位焊钳作业的过程。除此之外焊钳姿态的保持、转换、夹具的调整等动素都属于必要的辅助性动素。其中姿态的保持和转换是焊钳作业的难点。由于汽车车身点位多、作业量大，操作者上肢（包括臂、肩、腰部）因持续负荷运动而感到肌肉酸痛，难以保证手持焊钳的角度和焊点定位的精度。这对施焊质量造成了一定的影响。例如，左后轮罩内板总成工位共有 46 个焊点、焊点角度各异，操作者需要不断地变换焊钳姿态进行施焊（如图 3 所示）。长时间劳累或加之新员工手臂力量不足，导致焊点缺陷率上升。

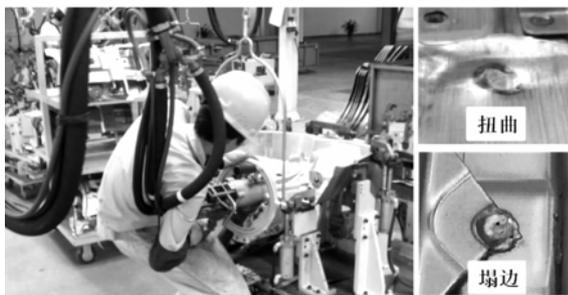


图 3 施焊动作及焊点缺陷

此外，汽车流水线作业对生产节拍要求很高，当日产量达到考验人体机能时，手持式点焊钳的瓶颈工位（点数多、焊钳姿态变化复杂）就会凸显出来，进

而影响到整体的生产节拍。如果生产节拍紊乱，之前所测定的标准工时也会出现较大的偏差。

### 3 焊钳动作经济五原则

动作经济性原则能够有效地降低劳动强度，极大地提高了作业效率，因而动作经济性原则在生产作业过程中获得广泛的应用<sup>[5]</sup>。动作经济性原则与焊钳动作优化的结合为寻求更高效的焊钳作业方法指明了方向。经过现场调研、分析和整理，最终提出焊钳动作经济五原则：就近原则，助力原则，分工原则，双手均衡原则，适配原则。现将焊钳动作五原则概述如下。

#### 3.1 分工原则

分工原则是指为减少大中型焊钳的转换动作数而专设一把或多把中小号型辅助焊钳，二者互补各有分工，负责不同作业区域。分工原则消除或减少了焊钳姿态转换动作，可以更好地发挥各型号焊钳自身特性，同时减轻了工人的劳动负担。

#### 3.2 就近原则

就近原则是指将焊钳平衡位置设在焊点群最集中处，配合转动的夹具来实现最短的动作距离。由焊钳运动原理分析可知，焊钳在自然状态下始终保持在一个平衡位置，它在各方向上（俯仰，偏转，扭转）受线缆的约束力基本上符合胡克定律。偏离大小与约束力成正比，因此焊钳平衡位置的选择以焊点群最集中处为参考。

### 3.3 双手均衡原则

双手均衡原则是指为避免用力不均导致的单臂疲劳,而使双手同时动作均衡用力。虽然焊钳点焊作业双手都是同时动作,但是双手施力不均也会造成很多影响,如有些工位需要工人单手持件完成部分的焊点,很容易造成手臂肌肉疲劳。若手指离焊钳电极头太近极易发生危险事故。对较重零件的补焊,可以专门安置一把固定焊钳,设置脚踏开关,双手持件完成补焊作业。始终寻求双手均衡用力才是合理运用双手作业的研究方向。

### 3.4 助力原则

它是指为了让焊钳更加灵活、省力,而寻求线缆弹力、重力的助力作用。一般来说俯仰姿态变换是 C 型焊钳操作一大难点,但却是小型号 C 型焊钳常用动作。如图 4 所示,焊钳位置随平衡器松紧度改

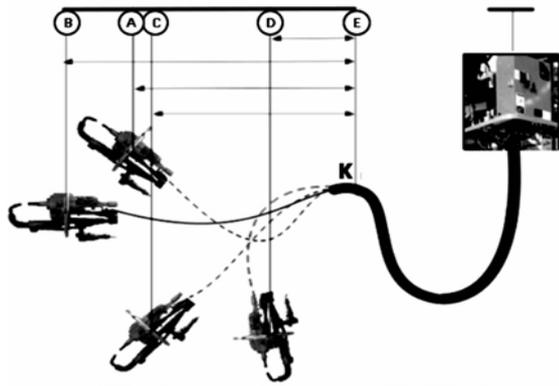


图 4 俯仰变化姿态

变而改变(松紧度大小关系为  $A > B > C = D$ ),将平衡位置处于 A 点的焊钳扶到直立姿态需要靠手臂和腰部力量同时发力。这样很容易使操作者感到疲惫。图中所示 D 点是非平衡状态,保持 C 点弹簧平衡器的松紧度不变把焊钳拉近,可以借助线缆刚性顶起焊钳尾端使之绕 X 轴旋转 to 直立状态。这种情况只有在类似 C 点处焊钳低头的时候才会出现,若焊钳不够低,就会做俯仰和偏转的综合转动。

### 3.5 适配原则

适配原则是指根据工位零件特点寻求焊钳和附件的合理选配方案,考虑因素包括副电缆的粗细、吊挂的类型、行程大小、尺寸大小等等。为了寻求较合理的选配方案,需要探讨以下焊钳操作性的影响因素。

#### 3.5.1 尺寸形状

焊钳按其形状共分为 C 型和 X 型焊钳两大类。C 型焊钳适用于焊点水平方向空间受限的焊点,一般多用于直立位置焊点。X 型焊钳适用于焊点垂直方向空间受限的焊点,以及纵深较大的焊点,一般多用于水平位置焊点。一般焊装厂用于实际作业的焊钳数量在 300 把以上,焊钳尺寸各异。为了便于分析,按其尺寸大小粗略地划分为大型号、中型号、小型号(如图 5 所示)。C 型焊钳由于自身偏心特性,大型号、中型号的 C 型焊钳不太适合于扭转或俯仰翻转的动作。X 型焊钳自身对称,相比 C 型焊钳易于翻转。

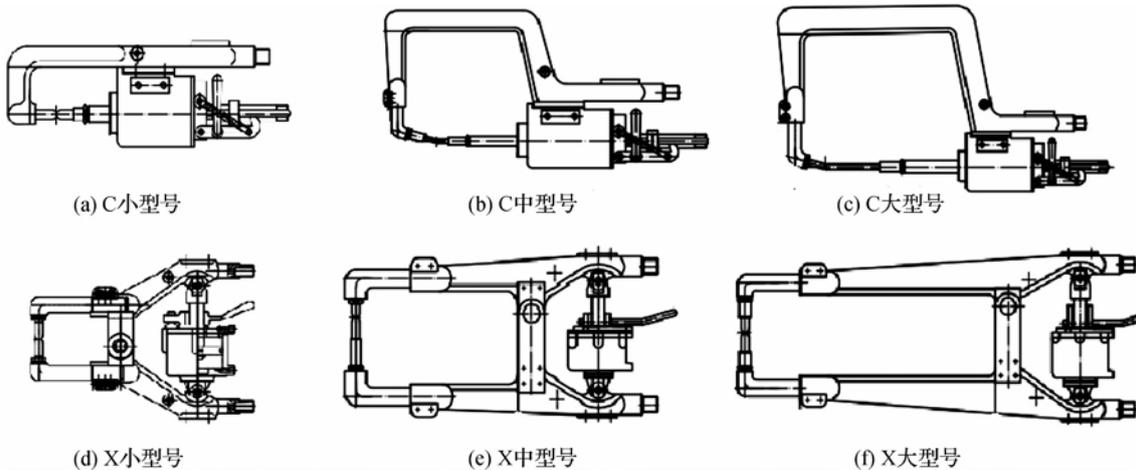


图 5 焊钳分类

#### 3.5.2 吊具形式

吊具主要有 D 型、D 型带滚轮和转盘吊具(如图 6 所示)。D 型吊具有五个自由度,无法扭转;转盘吊具有六个自由度;D 型带滚轮吊具介于二者之间,可在小范围内扭转。吊具的选配主要根据钣金

件上焊点的角度。若角度基本无变化(都是水平或都是垂直)则选择 D 型吊具;变化幅度较小可选择 D 型带滚轮吊具;变化幅度较大甚至超过  $180^\circ$  可选择更为灵活的转盘吊具。



图6 吊具类型

### 3.5.3 行程大小

焊钳上的行程切换装置用于调节焊钳开口大小。大行程可使焊钳避免干涉(夹具或钣金边沿)到达焊点位置,然后切换到小行程来加快施焊速率。合理设定行程的极限位置可以提高作业效率。若小

行程的下限设置过大,会导致焊钳对准点位的难度加大(集中注意力对准,这一动作属于18种动素中的第三类动素,对工作无益,应当消除<sup>[6]</sup>);若大行程的上限过小,则焊钳会与工件或夹具发生干涉。

### 3.5.4 线缆的粗细

线缆分为主线缆和副线缆。由于主线缆型号基本一致,这里只考虑副线缆的影响因素。副线缆分160 mm<sup>2</sup>和200 mm<sup>2</sup>两种,前者软一些更利于多姿态的变换,后者硬一些有利于大中型焊钳的增稳。若焊钳姿态复杂、焊机功率较小可选择160 mm<sup>2</sup>副线缆,则反之考虑选择200 mm<sup>2</sup>。

焊钳动作五原则由动作经济性原则发展而来,两者内容关系对比如表1所示。

表1 动作经济性原则与焊钳动作原则比较

动作经济性原则	内容要点	焊钳动作原则	内容要点
减少动作数	取消不必要的动作,合并两个以上的动作	分工原则	为减少大中型焊钳的转换动作数而专设中小号型辅助焊钳,二者互补各有分工
缩短动作距离	用最适当的人体部位、最短的距离进行动作	就近原则	焊钳平衡位置设在焊点群最集中处,同时配合转动的夹具,实现用最短的动作距离完成操作
双手同时动作	双手反面对称,同时开始同时完成动作	双手均衡原则	为避免用力不均导致的单臂疲劳,而使双手同时动作、均匀用力
轻快动作	利用重力、弹力、惯性等完成动作,连续圆滑地改变动作	助力原则	为使焊钳更加灵活、省力,可以借助线缆弹力、重力等的辅助作用力
		适配原则	根据工位零件特点,寻求焊钳和附件的合理选配方案

## 4 典型案例剖析

### 4.1 工位分析

某汽车焊装厂的左侧围后置物台安装支架总成OP20工位共有12个焊点,要求焊钳做到三个姿态转换,配有一把小型号C型焊钳和转盘吊具。其动作组成如表2所示。为了分析焊钳的受力情况,将焊钳作业姿态拆解成基本动作,并对每一个基本动作进行测量。首先记录焊钳的原始平衡位置作为测量基准(如图7所示)。

选取合适的测量方法是掌握现场数据准确与否的关键。须按照操作者实际的施力方式和施力点定位测量工具。由于施力过程是动态变化的过程,因此记录时只取最大施力值。测量工具采用高精度电子弹簧秤,量程为200 N,精度为1 N。三次测量取平均值之后记录测量值。改善前实测数据如表3所示。

焊钳转换到水平姿态时五个焊点的焊钳扭转角度依次为207、162、162、117和207°,显然副线缆扭曲严重。由表3可知,左手最大施力66.64 N,整个过程左右手负荷不均,左手是右手的2倍,而且转换焊钳姿态时,操作者要反复下拉焊钳0.5 m,动作不

连贯也造成了时间的浪费。现场工人反映该工位大批量作业时应付起来比较累。

表2 动素分析表

动作顺序	动作单元	符号	改善前时间/s	改善后时间/s
1	固定零件	#	14	14
2	握持焊钳	∩	3	3
3	对准点位	9	3	2
4	1-5点施焊	U	10	7
5	转换焊钳	∩	4	2
6	对准点位	9	3	1.5
7	6、7点施焊	U	3.5	2
8	转换焊钳	∩	4	2
9	对准点位	9	2	2
10	8、9点施焊	∩	3	2
11	松开夹具	#	2	2
12	转换焊钳	∩	3	1.5
13	对准点位	9	1.5	1
14	10-12点施焊	U	6	5
15	拆卸成件	#	3	3
	合计		65	50

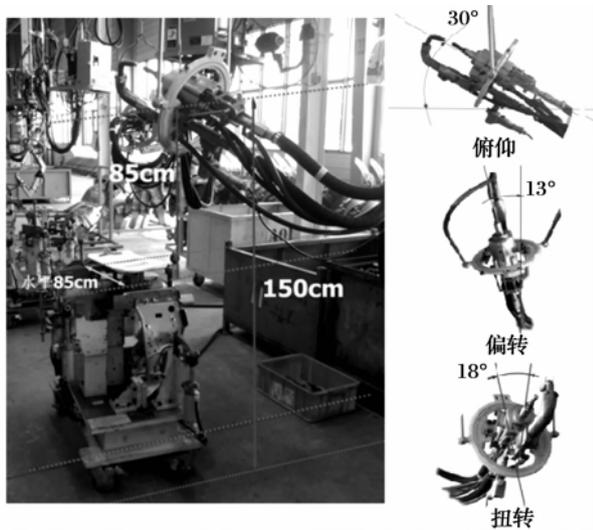


图 7 改善前的平衡姿态

4.2 改善实施

根据就近原则调节弹簧平衡器松紧度使高度降低,同时降低 K 点高度(参考图 4),以便实现焊钳“直立”和“水平”两种姿态的兼顾。焊钳的直立动作是运用了助力原则,即利用线缆的刚性将焊钳尾端顶起(如图 8 所示)。根据双手均衡原则,为减少左

手扭转负荷将 C 型焊钳的开口初始状态设置向下,改善后的平衡姿态和副线缆的安装方式如图 9 所示。重新设计焊钳的握持方式,使整套动作连贯紧凑。改善后的实测数据如表 3 所示。

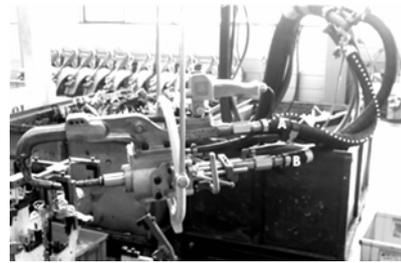


图 8 借助线缆竖起焊钳



图 9 改善后的平衡姿态

表 3 改善前后实测数据对比

动作姿态	改善前			改善后		
	顺序 1: C 型焊钳直立 作业,开口向内 点数 5	顺序 2: C 型焊钳直立作 业,开口向外 点数 2	顺序 3: C 型焊钳水平 作业,开口向下 点数 5	顺序 1: C 型焊钳直立 作业,开口向内 点数 5	顺序 2: C 型焊钳直立 作业,开口向外 点数 2	顺序 3: C 型焊钳水平 作业,开口向下 点数 5
X 俯仰/(°)	俯 120	俯 120	忽略	俯 90	俯 90	0
X 轴施力/N	左 35.3/右 24.5	忽略	忽略	忽略	忽略	忽略
Y 扭转/(°)	逆 90	逆 180 锁紧后再逆 45	逆 207	逆 90	顺 90	逆 45
Y 轴施力/N	左 24.5/右 忽略	左 56.8/右 32.3	左 66.6/右 37.2	左 9.8/右 9.8	左 11.8/右 17.6	左 9.8/右 7.8
垂直/cm	下移 50	下移 50	下移 70	下移 5	下移 5	下移 30
垂直施力/N	左/右 29.4	左/右 29.4	左/右 49	忽略	忽略	左/右 15.7
水平/cm	右移 85	0	左移 85	右移 70	0	左移 70
合计/N	左 59.8/右 24.5	左 56.8/右 32.3	左 66.6/右 37.2	左 9.8/右 9.8	左 11.8/右 17.6	左 9.8/右 7.8
平均/N		左 60.8/右 31.4			左 9.8/右 11.8	

注:1.某些姿态的变化角度很小,现有条件无法进行精确测量,因此忽略该角度的施力值;2.锁紧表示焊钳移动到位后,用手紧握转盘防止其转动;3.垂直方向施力主要靠身体重心和肘部同时下压,实际工作中此方向施力不易导致手臂疲劳,故合计不计入其中。

4.3 改善效果

改善后左手平均省力 51 N,右手平均省力 19.6 N,双手负荷基本平衡,动作连贯紧凑,单件作业时间减少 15 s(如表 2 所示)。优化后的姿态需要配合相应的技巧,因此对操作者进行适应性训练是有必要的。一般来说,动作越是轻松容易,适应时间也会越短。该工位的焊钳动作优化过程很好地体现了焊钳动作的经济原则。

5 结 语

焊钳动作经济五原则是动作经济性原则在汽车制造业焊装领域的具体应用和改进。它不仅为中小汽车焊装厂焊钳作业优化提供了理论基础,也为日后新车型生产线的组建、改型及夹具的设计提供参考。实践证明,对于以手持式点焊钳为主要加工方式的中小汽车焊装厂,掌握焊钳动作经济 5 原则是

提高生产效率的有效方式之一。

#### 参考文献:

- [1] 易树平, 郭 伏. 基础工业工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 152-176.
- [2] 周清华, 肖吉军, 杨 萍. 包装作业方法的工效学分析与优化[J]. 桂林电子科技大学学报, 2010, 30(4): 334-337.
- [3] 符 炜. 机构设计学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2001: 6-8.
- [4] 张正祥. 工业工程基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 160-171.
- [5] 史 烽, 陈彩艺. 基于 IE 技术的笔记本电脑生产线平衡优化[J]. 企业科技与发展, 2009(10): 32-34.
- [6] Barneg R. Motion and time study[J]. Design and Measurement of Work, 2000(3): 67-69.

## Application of Economic Principle of Action in Action Optimization of Electrode Holder

CHEN Guan-zhang<sup>1</sup>, WU Di-chong<sup>2</sup>, LI Ren-wang<sup>1</sup>, MO Can-lin<sup>1</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Business Administration, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In allusion to existing problems of action method of electrode holder in small-and medium-sized automobile welding plants, this paper proposes to apply economic principle of action in action optimization of electrode holder; puts forward five economic principles of electrode holder action based on the analysis on action principles and characteristics of electrode holder, including division of work, proximity, balance, assistance and adaptation principles; and verifies the principles above by analyzing actual case in typical station of an automobile welding plant. The practice proves that five economic principles of electrode holder action can effectively improve the production efficiency of enterprises.

**Key words:** economic principle of action; five economic principles of electrode holder action; action principles of electrode holder

(责任编辑: 张祖尧)