

液 压 伺 服 控 制

王占林 主编

北京航空學院出版社

内 容 简 介

本书对液压伺服控制系统的分析与设计作了比较详细的阐述,对液压伺服系统中的主要元件的静、动态特性进行了分析,对液压伺服控制的某些问题,如结构谐振、阻尼、非线性以及近期的研究课题等,作了专门的论述或扼要的介绍。本书根据北航、西工大等院校多年教学经验编著修订。本书可作为航空、宇航高等院校的教学用书,亦可供从事液压技术、自动控制、机械等专业的工程技术人员参考。

液 压 伺 服 控 制

主 编 王占林

责任编辑 肖之中

北京航空学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京关西庄印刷厂印装

850×1168 1/32 印张: 14.5 字数: 370千字

1987年10月第一版 1987年10月第一次印刷 印数: 5000册

ISBN 7-81012-024-7/TP·002 定价: 2.65元

前 言

液压伺服控制技术开始应用于航空方面，进行了飞机的助力操纵，这不仅减轻了飞行员的体力而且克服了跨音速时杆力的不可操纵性，使人类进入了超音速飞行；开始应用于火箭技术使飞行器冲出了大气层而进入了宇航飞行。特别是随着自动控制技术的发展以及与计算机控制的结合，使得液压伺服控制系统可以完成更加复杂的功能控制与高性能的动力控制，从而确定了液压伺服控制在航空、宇航应用中强盛的生命力与有利的竞争地位。在一般工业的应用上，由于它具有反应快、功率重量比小、精度高、抗干扰能力强等特点也受到了特别的重视，并作为一种新兴的技术领域正在迅速地发展。因此为适应四个现代化的要求，国家将需要愈来愈多的这方面的工程技术人员。

自1980.7由国防工业出版社出版由本书编者编辑的《飞机液压传动与伺服控制》以来的六年多中，编者根据本身的教学实践，并参考了目前国内出版的有关书籍编写了本书。本次编写侧重于液压控制的基本理论，围绕航空与宇航技术的应用进行取材，叙述简明扼要、便于自学，并且结合实际。

本书由北京航空学院与西北工业大学合编，编者分工情况为：

主编：王占林

编者：王占林（第一章、第四章、第七章、第八章、第十章、第十一章、第十二章一部分、第十三章、第十五章），裘丽华（第二章、第五章一部分、第十四章），张瑜（第三章一部分、第九章），喻统武（第三章一部分、第五章一部分），张毓铨（第六章、第十二章一部分）。

本书经何钺主审，并提出很多宝贵意见，在此深表谢意。由于编者水平所限，错误与缺点在所难免，希望读者批评指正。

目 录

第一章	绪论	
第一节	液压伺服控制原理、组成	(1)
第二节	液压伺服控制分类	(6)
第三节	液压伺服控制的特点	(9)
第四节	液压伺服控制的应用与发展	(13)
第五节	本书的论述方法	(17)
第二章	液压泵和液压马达	
第一节	齿轮泵	(19)
一	齿轮泵的工作原理	(19)
二	齿轮泵的理论流量	(21)
三	齿轮泵的功率和效率	(22)
第二节	叶片泵	(23)
一	单作用式叶片泵	(23)
二	双作用式叶片泵	(24)
第三节	柱塞泵	(25)
一	直轴式柱塞泵	(26)
二	斜轴式柱塞泵	(28)
三	柱塞泵的理论流量和容积效率	(29)
四	柱塞泵的瞬时流量与流量脉动	(30)
五	柱塞泵的吸油压力	(33)
第四节	液压马达	(34)
一	液压马达的工作原理	(35)
二	液压马达的效率、转速和扭矩	(36)
三	液压马达的性能要求	(38)

第三章 液压放大元件

第一节	滑阀液压放大器	(40)
一	圆柱滑阀的分类, 结构型式和工作原理	(40)
二	零开口滑阀放大器的静特性	(43)
三	预开口滑阀放大器的静特性	(52)
四	滑阀的轴向力	(55)
五	滑阀放大器的功率和效率	(59)
六	滑阀放大器的参数设计计算	(62)
第二节	喷咀挡板液压放大器	(64)
一	喷咀挡板放大器的典型结构和工作原理	(65)
二	单喷咀挡板放大器的静特性	(68)
三	双喷咀挡板放大器的静特性	(74)
四	喷咀挡板放大器的力特性	(79)
五	主要结构参数选择与计算	(82)
第三节	射流管液压放大器	(84)
一	射流管放大器的典型结构与基本工作原理	(85)
二	圆形喷咀自由沉浸射流的特性与射流管主要参数的计算公式	(86)
三	射流管放大器的静特性	(89)

第四章 动力机构

第一节	阀控液压缸	(96)
一	基本方程式	(96)
二	阀控液压缸的传递函数与方块图	(99)
三	阀控液压缸的主要性能参数	(107)
四	刚度	(111)
第二节	阀控液压马达	(113)
第三节	泵控液压马达	(115)
第四节	动力机构小结	(118)

第五章	电液伺服阀	
第一节	概述	(120)
第二节	力矩马达	(128)
一	力矩马达的分类与工作原理	(128)
二	力矩马达的磁路分析	(131)
三	力矩马达的电路分析	(139)
四	力矩马达的静特性分析	(143)
五	力矩马达的动特性分析	(147)
六	动圈式的力马达	(155)
七	力矩马达的设计	(160)
第三节	电液伺服阀特性分析	(167)
一	机械力反馈电液伺服阀	(167)
二	直接反馈式电液伺服阀	(188)
三	压力反馈式与动压反馈式电液伺服阀	(190)
第六章	机液伺服机构	
第一节	助力器的工作原理	(197)
第二节	助力器的稳定性	(201)
第三节	助力器的阻抗	(203)
第七章	电液位置伺服系统	
第一节	电液位置系统的稳定性分析	(207)
一	电液位置系统的传递函数	(207)
二	系统的稳定性分析	(210)
三	闭环系统的特性	(213)
第二节	系统的误差	(218)
第三节	液压舵机与复合舵机	(221)
一	电液舵机	(221)
二	复合舵机	(224)
第八章	电液速度控制系统	
第一节	阀控马达式速度控制系统	(232)

第二节	泵控马达速度控制系统	(234)
一	泵控开环速度控制	(235)
二	泵控闭环速度控制	(235)
三	开环斜盘回路控制下的泵控速度系统	(239)
第九章	液压力伺服控制系统	
第一节	概述	(240)
第二节	静止加载式力控制系统的分析	(241)
一	用有预开口滑阀的流量阀进行闭环控制的回路	(241)
二	用压力阀进行闭环控制的回路	(253)
第三节	运动加载式力控制系统分析	(256)
一	基本系统性能分析	(257)
二	对基本系统的校正方案	(267)
第十章	液压伺服控制系统的设计	
第一节	负载种类及其轨迹	(271)
第二节	负载匹配	(277)
一	根据负载曲线图形进行匹配	(277)
二	负载匹配的解析法	(279)
第三节	简易设计	(281)
一	设计的大体步骤	(281)
二	系统的基本方程与方块图	(282)
三	静态设计	(283)
四	动态设计	(288)
五	控制精度	(296)
第四节	系统特性的改善	(298)
一	串联校正	(298)
二	并联校正	(302)
第五节	设计实例	(305)
一	位置系统设计实例	(305)

二	速度系统设计实例	(317)
三	力系统设计实例	(333)
第十一章	结构谐振与综合谐振	
第一节	等效负载的计算	(341)
一	负载的折算	(341)
二	最佳减速比	(346)
第二节	结构谐振与综合谐振	(347)
一	结构谐振	(347)
二	反馈连结对系统性能的影响	(351)
三	提高综合谐振频率的途径	(353)
第十二章	液压阻尼技术	
第一节	液压机械网络阻尼	(355)
一	动力反馈 (DPF) 校正	(356)
二	动压反馈的进一步改进 (JDPF)	(364)
三	摇摆发动机系统JDPF参数的选取	(369)
第二节	用电网络实现阻尼	(385)
第十三章	液压伺服系统的非线性	
第一节	阀的流量——压力特性非线性对系统的影响	(389)
第二节	液压伺服控制系统中典型非线性对系统的影响	(392)
第十四章	液压能源	
第一节	溢流阀	(401)
一	溢流阀的工作原理	(401)
二	溢流阀的启闭静特性	(403)
三	溢流阀的动态分析	(404)
第二节	液压能源	(410)
一	定量泵—溢流阀组成的恒压能源	(410)
二	定量泵—蓄能器—自动卸荷阀组成的恒压能源	

	(412)
三	恒压力变量泵液压能源.....	(413)
四	对液压能源的要求.....	(418)
第十五章	液压伺服系统的专题研究	
第一节	发展中的问题.....	(421)
第二节	液压伺服机的研究课题.....	(423)
一	阀控驱动机构的特性解析.....	(423)
二	作用于滑阀的轴向力的研究.....	(425)
三	伺服阀的附加振动.....	(426)
四	连接导管的动特性解析与包含导管系的系统稳定性分析.....	(427)
五	超低速下的爬行.....	(427)
六	驱动部发生的气蚀的研究.....	(427)
七	PWM与bang-bang控制.....	(428)
八	多通道余度式伺服装置的研究.....	(430)
第三节	系统的优化设计与动态补偿.....	(431)
一	单输入单输出系统.....	(431)
二	多变数系统.....	(434)
三	对负载与干扰变化的补偿.....	(438)
第四节	参考资料.....	(446)
参考文献	(449)

第一章 绪 论

第一节 液压伺服控制原理、组成

液压伺服控制系统，是一种以液压动力机构作为执行机构并具有反馈控制的控制系统。它不仅能够自动地、准确而快速地复现输入量的变化规律，而且还能对输入信号实行放大与变换的作用。如图1-1，通过输入小功率的机械或电的控制信号，可以控制由油泵输出的大功率的液压动力，并经动力执行机构重新把液压动力转换为机械动力而驱动负载。

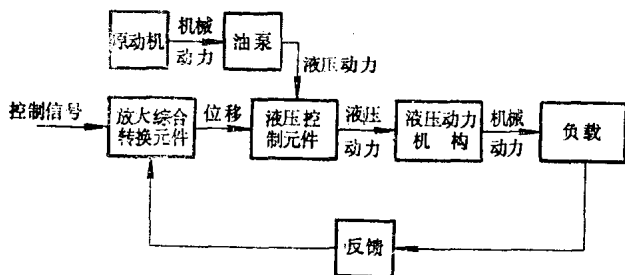
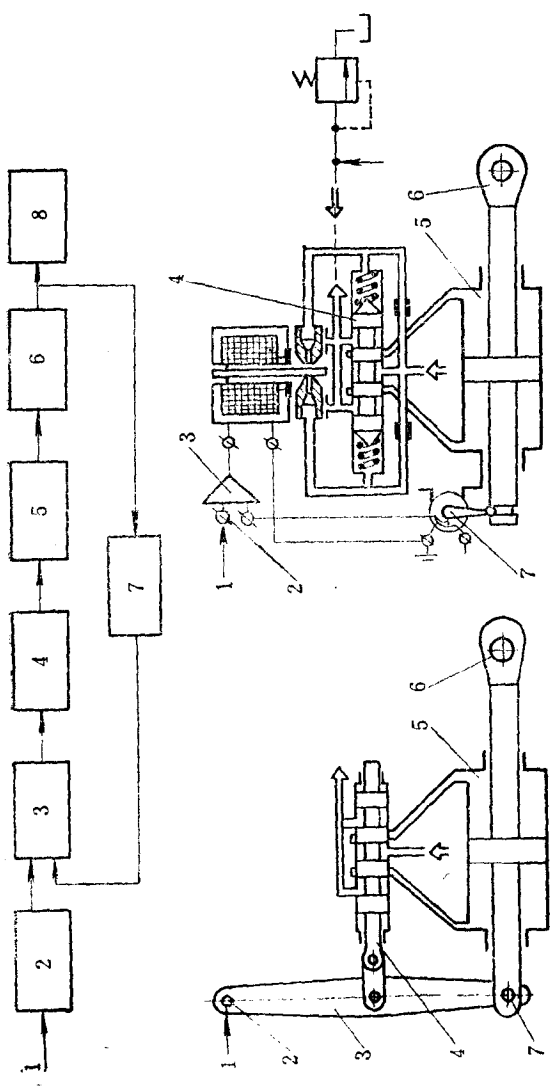


图1-1 液压控制系统

图1-2是飞行器上常用的机械液压伺服控制机构（或称助力器）和电液伺服控制机构的原理图。助力器主要用在飞机上，电液伺服控制机构在导弹上与飞机上都常使用。

输入信号1的改变，经输入环节2形成了伺服控制机构输入与输出环节间的失调量。比较装置3测量并放大此失调量，并形成与此失调量相应的、使调节装置4（力矩马达，喷嘴挡板阀，滑阀）工作的误差信号。调节装置4按着这个误差信号的大小和方



(b)

(a)

图1-2 机械与电液伺服机构

向，控制腔内工作液的流量5，从而驱动动作筒活塞6，然后通过反馈将活塞的位移反回输入端，从而构成闭合回路。如果将负载（舵面或摇摆喷管）连接在活塞杆上，就可以使负载位移或角位移与输入信号成比例。假如负载没有按输入信号改变位移，则反馈装置检测出它的实际位移量并加到输入端与指令信号进行比较，然后用两者之间的差值对活塞位移进行修正，直到输入信号与反馈信号之差等于零为止。因此，系统是按着输入与反馈信号之间的偏差进行调节的。

根据系统的组成情况，信号的给定方式可以是各种各样的。图1-3上示出了该执行机构在整个飞行控制回路中的位置。来自稳定系统的信号可能是陀螺或其他传感器给定的。来自于控制系统的信号可能是由某种电子转换器给定。对于机液伺服机构的输入信号，常是飞行员给定的杆位移或通过其他的小功率的伺服机构给定的机械位移信号。反馈装置可采用电位器、同步器、差动变压器等。但由于机械反馈的可靠性高，故电液机械反馈伺服机构被看成是电反馈产品之后的新一代产品而受到重视。

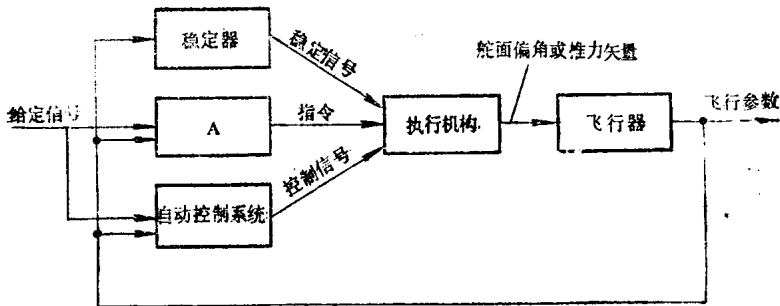


图1-3 飞行控制系统回路方块图

图1-2所示的伺服控制，其输出是位移，故称机械液压位置伺服控制系统和电气液压位置伺服控制系统。

图1-4是作为速度控制系统的实例，常用于航空器交流电源的稳频装置上。飞行器的交流发电机常常是由发动机带动的，但航空发动机的转速随着飞行条件而变化，故发电机的频率必将随发动机的转速变化而变化。为了使发动机转速变化时，发电机的频率保持恒定，则在发动机与发电机之间接入如图1-4所示的恒速装置。该装置的油泵由发动机带动，输出带动发电机。离心配重式转速传感器与输出轴联接，它测定系统输出轴的实际转速并与调定转速进行比较，所得的差值信号即滑阀的位移，进而操作作动筒改变油泵斜盘位置来控制液压马达的转速，用以补偿转速偏差，保持输出恒定转速。

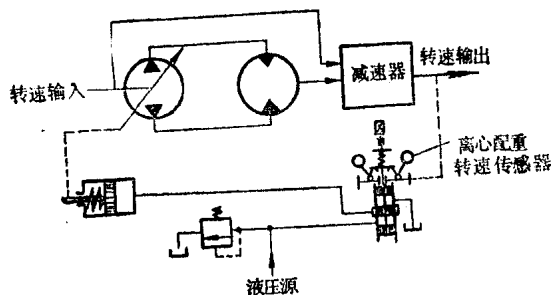


图1-4 恒速装置原理图

图1-4是采用机械式转速传感器，故称机械液压差动式恒速装置。如果该系统的斜盘控制是采用如图1-2 (b) 所示的电液位置伺服控制作为前置级，输出齿轮传动上带动一个测速电机，并把它测出的转速信号反馈到伺服放大器的加法点与前面的速度指令信号相比较，那么该系统即构成电气液压式速度伺服控制系统。其方块图如图1-5所示。

力或压力的液压伺服控制，在航空技术中，常用在地面的模拟加载装置中。一种最常用的力控制系统原理图1-6所示。其中受载体即被加力的对象常是有弹性的物体，如刹车系统的刹车片，

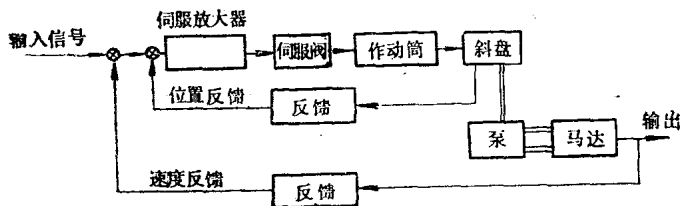


图1-5 电液速度伺服控制系统方块图

飞机或导弹的翼面，也可以是材料试验机上的试棒。力控制系统的功能是按给定信号给受力对象施加一个力，故也称施力系统。图1-6中是通过一电液伺服控制系统对受力对象施加一个力，由力传感器将此力测量并反馈到输入端与给定信号比较，用比较信号的误差信号去修正阀芯位移。从而使加载力与给定值基本一致。

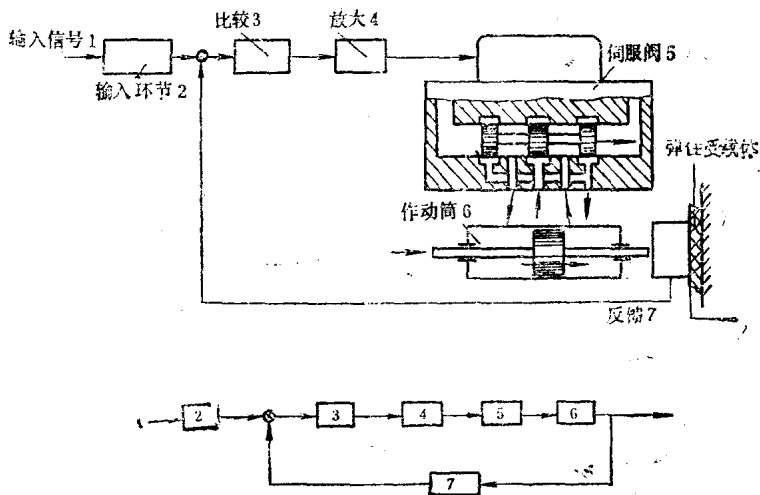


图1-6 施力系统原理图

除了上述的位置、速度、力的伺服控制外，常用的还有加速度控制，如实验室中用的模拟导弹或飞机振动的振动台，即属于

加速度控制，此时所用的反馈传感器是加速度传感器，加速度传感器测出输出轴上的加速度信号并与给定信号比较，按此比较的偏差信号进行控制。

综合以上所述：液压伺服控制原理与一般伺服控制一样，其工作原理都是按输入信号与反馈信号的差值进行工作的。即按偏差的控制原理工作。这种具有反馈的控制，我们称为伺服控制。伺服控制可以实现被控制量按控制信号给定规律变化的控制目的。显然对没有反馈作用的开环控制来说是达不到此目的的，因为它没有修正偏差的能力。液压伺服控制的基本组成有：给定信号、比较器、放大变换器、调节器或称调节机构、执行机构、反馈装置、被控负载及液压能源等。控制调节机构所需的信号功率是很小的，而系统的输出功率可以很大、如此大功率的输出是靠能源供给的。因此，正如图1-1所示的那样，液压伺服控制系统也是个控制原动机能源输出的装置。

第二节 液压伺服控制分类

液压伺服控制属于一般伺服控制的一种，故其分类方法也可按一般伺服控制的分类法，如根据系统的输入信号模型可分为：输入信号为定值的恒值系统，这种系统也称保持型系统；输入信号为某一固定规律的程控系统；输入信号为任意规律的跟踪型系统。

按被控的物理量来分，可分为位置伺服控制，即每给定一个输入量对应一个确定的输出位移或转角；速度伺服控制，即每一个输入信号对应一个输出速度或角速度；施力控制系统，其输出量是力、力矩或压力。此外还有加速度及温度伺服控制系统等，但在液伺压服控制中，最主要的是前三种，本书将作重点论述。

按调节机构或液压控制元件的形式可分为节流控制与容积控

制。节流控制如阀控作动筒，阀控马达等。容积控制调节机构常采用变量泵控制或变量马达控制。在第一节的原则叙述中，图1-2为节流控制。图1-4中的动力机构部分是采用容积控制的泵控马达系统。

容积控制系统例如泵控马达系统，变量泵的工作压力等于负载所要求的负载压力。变量泵所需流量等于负载所要求的流量。因此原动机拖动变量泵所消耗的功率能较好地与负载所要求的功率相配合，因之功率浪费很小，用起来很经济。

节流控制系统则不同，由于滑阀窗口的节流作用，能源油泵的工作压力一部分消耗于克服负载做功，一部分消耗于窗口的节流损失，这部分能量变成了热量，使油温升高。

再来看看泵的流量，为了满足系统工作，泵所供给的最大流量要等于负载所需要的最大流量。但在调节过程中，系统不是总处于最大流量工作的。当负载需要小流量时，滑阀窗口关小，通过阀的流量减少。泵供给的多余流量，从溢流阀溢走（参看图1-2）。这部分溢走的压力油没有参加系统工作，其能量消耗于溢流阀的节流口，也变成了热量使油温增高。

因此，在节流系统中，能量利用不是很经济，且为了降低油温还常常需要一些冷却降温的措施，如加冷却器等。这些都是它的缺点。而容积系统功率损失小，但系统比较复杂。更主要缺点是容积系统的动态特性很大程度上和变量泵的性能有关，变量泵往往有较大的惯性，变量泵与执行元件之间封闭油路较长，封闭容积较大，这些都造成容积系统反应速度较慢。另外变量机构通常需要一套小型的伺服机构（图1-4，图1-5），其功率约为主回路功率的2~10%左右，还常需单独能源。这些都是容积控制的严重缺点。因此目前应用较多的还是节流式伺服控制，它的反应速度较快，虽然效率较低，但用在功率不太大的系统上，问题不是太严重。因此在飞机与导弹的舵面操纵与推力矢量控制中广泛的采用节流式伺服控制。大功率系统中往往不一定要求太快的反

应速度，而功率损失常是关键，故趋向于采用容积式伺服控制。设想如果能把容积系统的快速性提高的话，从节能的角度，容积系统将有更大的前途。

按信息传递介质分类，液压伺服控制尚可分机液伺服控制，电液伺服控制及气液伺服控制。

机液伺服控制的给定信号为机械位移。飞机上用的液压助力器是典型的机液伺服控制（图1-2（a）），它的优点是简单可靠，缺点是系统的校正及增益的调整不如用电信号方便。电液伺服控制是指在系统中，功率级以前的信息是以电信号的形式传递的（图1-2（b））。电子、电气元件对信号的变换放大、测量与校正、调制与解调都较方便。因此电液伺服控制具有更大的灵活性，特别能和电子计算机结合，使反应快、刚度大的液压系统有了更加复杂的功能和更加广泛的适应性。实际上，现代飞机上都是将机液伺服控制装置与电液伺服控制装置通过复合摇臂结合在一起而构成复合舵面伺服机构，可在飞行员驾驶飞机的同时，达到利用自动装置或自动控制系统通过电信号操纵飞机的目的。图1-7是其中的一种结合形式。图1-8是机液伺服控制装置与电液伺服控制装置构造在一个附件壳体中的整体式舵面伺服机构——复合舵机。这种复合舵机的特点是，整个系统的输出环节的位置反馈是机液伺服控制装置的反馈，而电液伺服控制作为前置级也有自己的单独反馈。

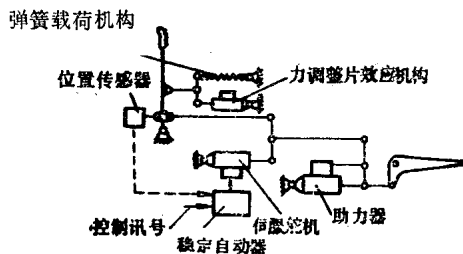


图1-7 舵面操纵系统的自动控制简图

气液伺服控制的信息给定是气压信号，通过膜盒、弹簧管等气动元件，将气压信号转换成位移，去控制液压调节机构（滑阀等）。气动元件的结构简单并可在恶劣的环境（高温、振动、易