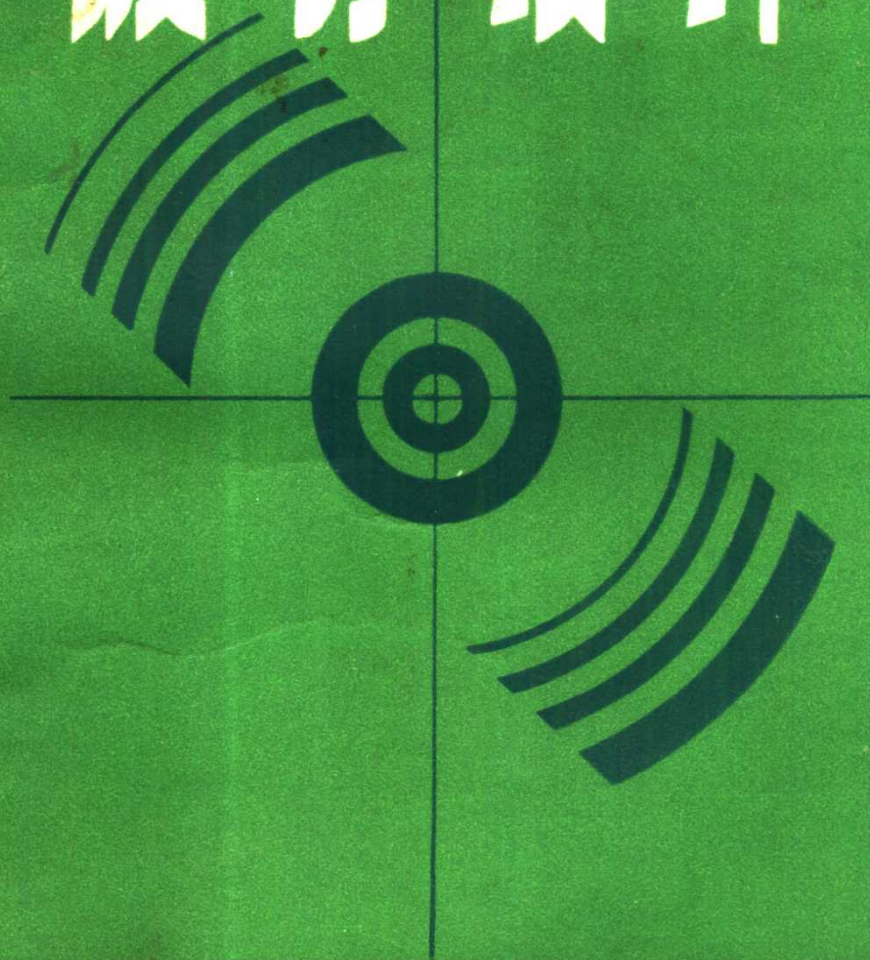


〔美〕 C. C. 奥斯古德 著

疲劳设计



科学出版社

疲 劳 设 计

〔美〕C. C. 奥斯特古德 著

李寿同 仇仲翼 译
王裕昌 曾春华 校

科 学 出 版 社

1 9 8 2

内 容 简 介

疲劳是现代工业中亟待解除的隐患。本书对疲劳设计的思想、疲劳寿命的估算、疲劳设计方法的特征、机械零件的细节设计以及特殊环境下的疲劳等主要课题作了详细的阐述,对一些非金属的疲劳问题也作了简单介绍。此外,还对疲劳机理进行了初步的探讨。

本书可供机械制造如飞机、汽车、机车、船舶等有关工程技术人员和研究人员参考。

C. C. Osgood

FATIGUE DESIGN

Wiley-Interscience, 1970

疲 劳 设 计

〔美〕C. C. 奥斯古德 著

李寿同 仇仲翼 译

王裕昌 曾春华 校

责任编辑 杨家福 童安齐

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1982 年 1 月第一次印刷 印张: 18 1/8

印数: 0001—4,500 字数: 418,000

统一书号: 13031·1789

本社书号: 2430·13—2

定价: 2.80 元

序 言

所有机器和结构设计都存在疲劳问题，因为它们总是受到自然力的作用，而且都必须以某些方式作出反应。长期以来，作者对如何确定个别特性响应问题很感兴趣，因而撰写了本书。书中主要讨论特殊条件下上述疲劳问题的解。疲劳设计中的基本问题——寿命预计方法的比较也包括在本书之中。作者试图使本书适用于从事这些课题的实际工作的工程师、设计师和教师。本书不打算写成一本教科书，因为有关标准推导和相关学科如应力分析等已有许多精辟的论述。我的目的是说明某些已被人们所接受了的方法的局限性，以及探讨由这些方法所得到的解答的现实性和有效性。

非常感谢我的朋友们，他们在讨论疑难问题时如此慷慨地花费了他们宝贵的时光。RCA 公司天文电子部的管理机构在完成初稿过程中给予了大力支持，也在此特别表示感谢。

本书希望对正在努力认识 and 解决疲劳问题的人员有所帮

C. C. 奥斯古德

目 录

第一章 引言: 范围、水平、限度	1
第二章 设计方法的特征	4
2.1 广泛性和稳妥性	4
2.2 载荷, 应力与稳定性分析	7
2.2.1 稳定性分析	10
2.3 损伤与破坏准则	12
2.4 安全-寿命与破损-安全设计	19
2.4.1 安全-寿命设计	23
2.4.2 破损-安全或损伤容限设计	26
2.5 安全系数与可靠性的关系	40
2.6 最小重量设计	46
2.7 机器与结构的对比	48
第三章 疲劳寿命的预计	50
3.1 预计寿命的方法	54
3.1.1 稳妥性评价	58
3.2 累积损伤的分析	59
3.2.1 线性定律或 Miner 定律	62
3.2.2 非线性损伤和损伤边界定律	106
3.2.3 置信度和统计学	146
3.3 设计实践	193
3.4 特殊的课题	205
3.4.1 接头和凸耳	205
3.4.2 声疲劳	287
3.4.3 温度影响和热疲劳	298
3.4.4 腐蚀和疲劳	317

3.4.5	压力容器和导管	324
3.4.6	辐射的影响	351
3.5	机械零件	353
3.5.1	轴承	353
3.5.2	齿轮	380
3.5.3	弹簧	389
3.5.4	受循环应力的各种零件	404
第四章	一般因素	410
4.1	疲劳机理	410
4.1.1	提要	410
4.2	疲劳试验和数据形式	419
4.2.1	目的、方法和估算	419
4.2.2	数据、方程和作图的形式	450
4.2.3	疲劳损伤指示器	462
4.3	材料性质和处理	466
4.3.1	碳钢和合金钢	467
4.3.2	不锈钢	472
4.3.3	铝合金	478
4.3.4	镁合金	487
4.3.5	钛合金	493
4.3.6	铸铁和铸钢	502
4.3.7	一般的非铁金属和合金	508
4.3.8	塑料,夹层板和合成物	517
4.3.9	混凝土	532
4.3.10	玻璃和陶瓷	537
4.4	残余应力和表面处理	539
4.4.1	残余应力	539
4.4.2	表面处理	549
参考文献		556
后记		574

第一章 引言：范围、水平、限度

可以说,所有的应力分析基本上都是疲劳分析,所不同的只是所施加应力的循环次数多少而已。理论上的静载荷可以作为单一的循环来处理。但是,完全不承受交变应力的结构与机器是极少的,因此,可以把平均应力认为是静载荷。在寿命谱的另一端,大量早期的疲劳研究及以后的许多工作都着眼于持久极限——一个最小的循环应力;如果工作应力低于这个最小的循环应力,其寿命可以认为是无限长的。导致持久极限概念与假定应力应变为线性关系这两种想法的发展是相似的东西。要是虎克在他的实验中不是采用铁基合金,并且早期的汽车研究者们能够更多地注重轻金属而不是钢的话,这些基础东西应该早就象近似法和特殊情况那样为人们所正确地认识了。正是这种情况,才使得象低循环疲劳这些早该认识的现象仅到最近才被发现。而且人们必须重视事后醒悟的必然性:从事学科研究的作者与研究人员在任何时候都未必能做到不利用前人著作的精华。当然,力学与材料强度知识的现状仍然处于三个世纪前就由虎克开始的发展曲线的顶峰状态。这条曲线的整体代表着一个巨大的资料宝库,而十分幸运的是,其中很多资料对疲劳设计是有用的。

所有这些都说明,设计人员有一切理由去利用前人著作中的结果。本书中涉及的一般知识就是从这些结果中孕育出来的,如果撇开它们,就难以认为这些知识是正确的了。当然并不是解决了所有的疑问及回答了所有的问题,但确有许多(或许是足够的)资料,利用它们就能对问题作出合理的综合

解答。从单个的 $S-N$ 曲线中取一个应力作为初步设计的根据,通常是不允许的。

在整个设计过程中,被称为疲劳设计的这一部分只是在载荷与应力分析完成之后才能进行。一般来说,这里预先假定这样的分析已经正确地完成了;这对已出版的许多优秀著作^[13-21]中的关系式与方法也是适用的。但是,疲劳设计的质量取决于下面指出的许多因素,而不单单是载荷与应力分析的质量与完整性。特别是一个疲劳问题的应力分析进行最后一次或两次叠代时,主要由于对细节要特别注意,所以这些步骤还互相交掺。在这里,“细节”一词的含意不仅是指形状或尺寸公差等细节,而且还包括象疲劳强度在顺滚轧方向或垂直于滚轧方向的差别、局部屈服的程度、在应力集中系数计算中的二次效应等等。在载荷分析之后,能用单独的和个别的方法圆满地解决设计问题是很罕见的,更不能靠单独的应力分析组或疲劳设计组来解决问题。现实的解决办法是这两个组必须共同工作,特别是在反复地使材料的疲劳强度与零件的尺寸、形状最终满足经常有某些变动的应力图时。在一个大的工程中,例如设计一架新的飞机结构,全体人员必须把工作进行到底,杜绝人员大量的变动。这样,领导设计的工程师与设计师必须负责协调工作,此项工作要求他们具备相当熟练的识别与解释能力。

对应力分析各个阶段的结果和疲劳损伤理论的应用加以区别是十分重要的。应力分析用于确定结构中任意一个危险点的应力历史;而确定在同一位置上裂纹状况随应力历史的变化关系,则是疲劳损伤理论的应用问题。但即使有了完善的疲劳损伤理论,在应力分析完成之前,仍无法解决疲劳寿命的预计问题。

在开始做任何预计寿命的工作时,必须充分认识到,金属

中(或许在所有材料中)疲劳裂纹的扩展是一个统计上的随机过程。在任何承受自身载荷的结构中的应力,以及这些结构中材料的性质与状态,也是以随机的方式变化的。所有这些变化因素的综合影响,最后使结果产生很大的分散性。根据目前技术发展的水平,人们不能指望作出一个非常精确的寿命估算,下面将讨论几种计算方法的精度、置信度与稳妥性。

第二章 设计方法的特征

2.1 广泛性和稳妥性

疲劳设计,或者象有些人说的防疲劳破坏设计,可能有以下几个目标:无限寿命、零重量、无限强度或100%的可靠性,或者可能四者兼有。我们必须现实地看待这些目标,正如Shanley^[14]所说的:“当可以达到的既不是零重量,也不是无限强度时,无疑前者是较好的目标。”当把一个设计作为疲劳问题对待时,这意味着寿命或疲劳应力水平已被选作控制因素。为达到这一决定状态,人们必须完成充分的载荷分析,其作用方式,以及至少在极限强度、屈服极限、疲劳强度或损伤百分比这些通常的破坏准则中选出作为设计依据的最终应力。也就是说:或者在单一应力作用的情况下没有破坏的可能性,这样实际就不存在选极限强度或屈服极限作为破坏准则的问题;或者是破坏概率低到象做了一个不合理假设的程度。于是就必然提出广泛性的程度问题,人们或许要问:“解答究竟要完善到什么程度?”

目前的设计状态是这样的:所要考虑的设计的题目就指出了疲劳考虑所需要的总的程度。但在触及这个问题时的实际难题是如何处理已知因素和数据的水平问题。与疲劳问题或可能成为疲劳问题的设计任务有联系的参数,包括下列一般项目:

安全: 部分破坏或灾难性破坏的后果。

现实性: 在性能要求的说明中。

现实性：关于所有引伸出来的要求，如最小的重量或最大的可靠性。

费用：特别是设计费用与零件费用之比或设计费用与收回投资之比。

时间：设计与试验工作，以及根据试验结果修改设计的日历时间。

水平：设计工作的水平，即用计算机反复计算来自局部试验得到的分类的 $S-N$ 曲线或用计算尺处理手册上的数据。与疲劳设计有关的更专门的参数，包括：

情报：使用方式，环境，例如特殊的腐蚀。

载荷：大小与频率。

分析：程度与精度。

材料：数据的可利用性和适用性。

材料：选择的确实性。以前的设计：不合格的程度，作为重新设计的理由。

制造：方式的选择，以及由此而产生的损伤估算。

制造：人与设备的质量。

维护：人的质量与工作周期的长度。可能除了环境情况与维护外，后面这些项目都是设计人员控制的，但是一般性的项目常常是要给设计人员指明的。

假定在通常情况下，分析是足够广泛与精确的，并且可以据此概括地提供一个适当的可接受的应力图，而且这些应力均落在现有材料的总的的能力范围内，而有关下面的这种问题常常需要根据具体情况作出判断。一根在腐蚀介质中工作的高速泵轴需要有一个镍或镍-铬的表面，作为第一次近似，就能给出任一个有效寿命。第一次可以选择一根不锈钢轴，但在真正的结构中为达到所要求的疲劳强度，就需要一根笨重

的、直径很大的轴。第二次可以选择具有适当强度与直径的中或高合金钢,但需要镀上防止腐蚀的铬层。现在,由于电镀降低轴的疲劳强度,因此又要加大轴的直径,而其增大的部分也许可用电镀后的烘烤除氢加以补偿。但究竟能补偿多少?并且还有最小的直径是否足以确定材料和镀层(而镀层可能比单一材料更花钱)加上时间和第二个卖主的(或至少第二个部门)卷入等问题?设计人员试图使用一个折衷办法:采用因电镀而使疲劳强度减低的高合金钢,并冒险不烘烤除氢,但是这种做法的稳妥性可能是成问题的。他可以再检查轴与轴承的相对位置、它们的外形及应力集中因数、用喷丸强化改善单一材料轴的疲劳强度的可能性等等。

这种变动的例子举不胜举,必须根据各自的具体情况予以解决。如上所述,虽然分配给某项任务的资金与技术力量超出了设计人员的控制范围,但这些专门的参数以及对这些参数的处理完全是设计人员控制的。的确,设计人员的地位就是要求他对所有能应用的参数进行适当的处理。可见,设计的成功与否,很大程度上既决定于允许的资金和时间,又决定于根据分配的资金与时间允许应用的那些已知资料的程度。

除了那些最简单的和直接的形式外,稳妥性多少带一点主观性。在一根施加了载荷的金属丝中,其拉伸应力与材料屈服强度的比值(不管人们是否对任何一个给定大小的比值都赞同)作为稳妥性的一个度量是容易被接受的。但是,举例来说,在 Miner 累加^[30]中 1 的值的有效程度、在应力集中系数的计算中解释量纲的方法,以及对疲劳应力数据分散性所引起的容差等问题的看法上,难免受到个人从前在小试件上所得经验的影响,也受到他本人工作态度——是草率从事还是小心谨慎的影响。稳妥性是一个广泛的题目,不易概括,并

且象所有基本原理一样，易陷入无穷无尽的争论中去。如果人们要求设计人员谨慎，往往就趋向于增大截面，从而增大了重量。力求减少名义应力，但结构的抗疲劳设计却未必得到改善。在现实的基础上注意细节和运用工程判断力，可能是对稳妥性一词最重要的表示。不应把这个术语理解为谨小慎微或胆小的意思；如果载荷分析的精度与破坏的后果已经为所有有关方面接受，那末适当的设计表示其工作应力在塑性范围内是完全可能的。

疲劳分析通常是设计过程中的最后一步，在许多情况下，往往需要对初期的某些结果作一番重新考虑，例如在几个横截面上材料分布的最佳化程度（如在加筋壁板中最佳框架面积与间距）。象轮廓与材料效率这些参数的必要性与有效性正被人们更广泛地认识到。如果有了这些参数，就可以在精细研究下非常透彻地了解设计的稳妥性。除了最后成功或失败这种简单的合格或不合格的试验之外，可能没有更简单的、直接能为所有有关方面都可接受的度量稳妥性的方法。不过，作为对上述这个好象是最后声明的一个改进，在 3.11 节对几种预计疲劳寿命方法中所带有的稳妥性进行了比较。

2.2 载荷、应力与稳定性分析

作为疲劳设计的一个明显的先决条件，必须按所需要的完整性与精度知道工作载荷、载荷作用方式和作用频率以及最后合成的应力场。由于疲劳本来是一个动态现象，所以不可避免地要知道动载荷，并且任何“等效静态”分析都应以适当的稳妥度来处理。

动载荷与动应力的分析容易变成一个非常复杂的课题；对于这些问题，一般来说，由已经推举的几本参考文献去论

述。但对下面的例子却进行了充分的讨论，以便指出广泛性与稳妥性的可接受的程度。然而，这里应该注意，不仅对动载荷必须作分析，而且还要包括大规模的寿命的分析，这是很重要的。运输设备和加工设备要求长寿命——2000 转/分，这就很轻易地超过了每年 10^9 个循环，这就指出了持久极限的应力水平。然而，许多宇宙飞船在它们工作寿命期间几乎不经受或经受不重要的应力，但在发射的这个相当短的时间内（5—10 分钟），则经受非常严重的应力，从而使它们的疲劳寿命降低到约为 10^5 个工程水平应力循环，加上声波出现则约为 3×10^5 个循环。因此，对这些短的使用期限，取比较高的疲劳强度是合理的。对于宇宙飞船和导弹，需要一个在试验期间所消耗的寿命部分的附加系数，因为振动与声波试验程序经常为总寿命中一个主要的部分。实际上，这些飞行器的设计，与其说是针对使用寿命，不如说是更多地针对振动试验的技术要求。

载荷分析的处理越来越精益求精。在一些较老的汽车设计工作中（1940 年以前），一个关键性的零件（譬如说转向关节）上的最大载荷是在“粗糙”的路面上，用不同速度行驶时，用应变片贴在转向关节上测得的。然后，在没有载荷水平的频率分布等参考资料的情况下，将测得的峰值载荷，通过零件的几何形状和应力集中系数转换成相当无限长寿命的许用应力。近期的文献指出，这种载荷的频率分布是正态或高斯分布，于是可以在一些更加安全的基础上应用其他的外推法。恐怕对于那个时代的汽车零件，这样一个方法不论在技术上还是在经济上都是合理的。人们可以在这个设计中安全地应用刚体力学，而不需要严格地应用最小重量准则，否则转向关节偶然性的破坏，容易引起心理上的紧张（这种可能性究竟是很小的）。所有这些都倾向于支持这个结论。

但在近代,在陆地、海上、空中以及宇宙航行所用的车辆、船泊、飞行器运载工具等方面,最小重量、非刚体力学、极端的安全可靠则是必不可少的条件,这时最可接受的方法是目下十分熟悉的概率方法。载荷出现的性质是统计随机的,至少对于一个不依靠地面构架运动着的物体是如此。对于固定的、转动的机械,载荷循环的变化或者已知,或者不大,或者是两者兼有,但这样一种限制不能安全地用于运动着的运载工具的设计上。对这种运载工具,载荷分析广泛地应用功率谱密度(PSD)法,因为现在普遍同意载荷的来源比如大气的湍流、道路的颠簸以及推进剂的燃烧等,可以用一连续的、稳态的随机过程适当地表示出来。功率谱密度法有如下优点:

1. 比起在某些循环数内的不连续的最大载荷的假设来说,这个方法提供了一个载荷具有连续性的更加真实的表示法。它能说明输入函数的梯度距离与形状改变的原因。

2. 功率谱密度法在典型工作剖面图的结构内,可以很容易地引伸到不同位置的载荷水平所出现的频率曲线上。于是,它可以直接地和定量地算出新设计与老设计在有关正常的或老的工作条件与“设想的”或新的工作条件间的任何差别。

3. 它能合理地说明结构的外形与响应特性,即如果一个新的设计包含(或怀疑它包含)不同频率模式或不同阻尼,就可以正确地考虑由于这些因素所引起响应的变化。

4. 与以上紧密有关的是求解运动方程的计算机技术的最新发展,功率谱密度法对计算机是非常适合的。目前已实用的是:将复杂的载荷图的动力特性的表示式加以充分的改进,就不仅能计算刚体的运动,而且也能计算弹性引起的运动和导航及控制设备的影响。

由于需要高的技术水平与大的工作量,再加上计算机设备,以致使功率谱密度法的使用有点昂贵。由于这些因素,加

上对计算过程相对不熟悉,使这个方法应用的多样性受到限制。一项众所周知的工作是目前正由飞机结构设计师等进行的,题为“动载荷与阵风载荷准则”。当然,引起他们做这项工作的动机是为了得到更轻、更安全的结构。然而这些进展不会由他们自身直接完成,这里仍然需要分两步进行。第一步,也是最重要的一步,是修改或重新研究结构准则,用这个准则建立起任一给定的运载工具所要求的强度水平。第二步是将新方法纳入程序,借此得到设计载荷与完成应力分析,以保证结构所有元件强度的一致性。作为一个例子,在 3.2.1 节中略述了阵风载荷谱到应力谱的转换。另一种类型,例如在全尺寸的自动化设备上用功率谱密度分析与随机载荷试验(用较新的、伺服控制液压机)相结合的工作,也在大力开展。

2.2.1 稳定性分析

这种分析及其实验验证构成与载荷及应力分析密切相关

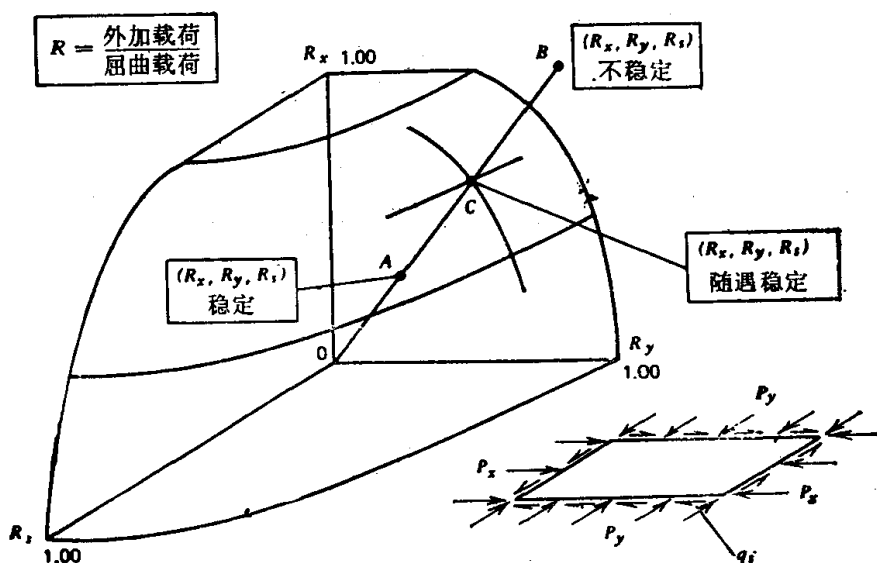


图 2.1 组合载荷下的屈曲。图 2.1 至图 2.7 取自参考文献 [312]

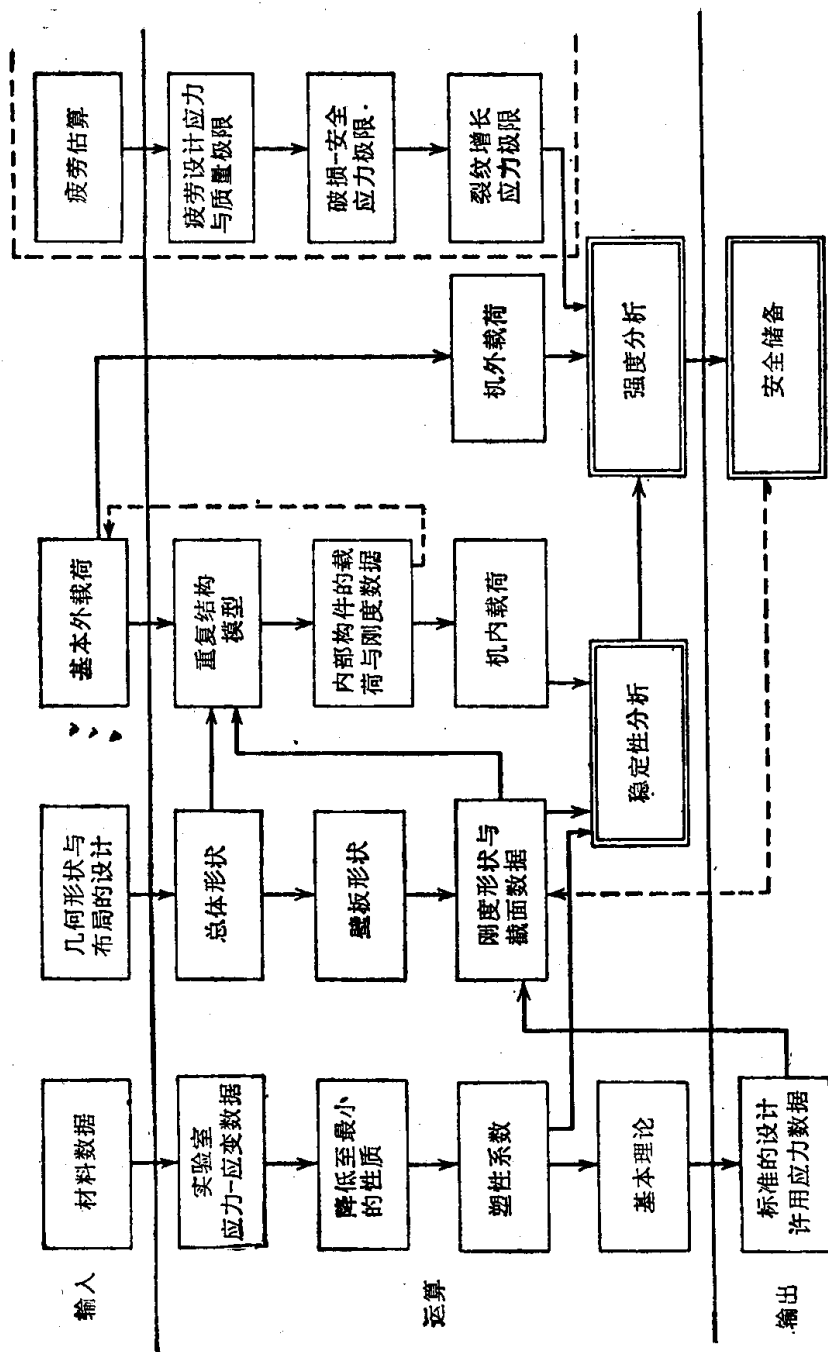


图 2.2 稳定性与强度分析