

# 基于 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架的结构设计优化

李 珺<sup>1</sup> 杨 扬<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(湖北工业大学工业设计学院 湖北 武汉 430068)

<sup>2</sup>(华中农业大学工学院农业部长江中下游农业装备重点实验室 湖北 武汉 430070)

**摘 要** 在基于仿真模型的结构设计优化中,需要多次进行几何建模和仿真分析,耗费设计人员大量的工作时间。单一的软件不能或者难以完成几何建模、仿真分析及优化求解等工作,有效集成多种软件对产品进行参数化建模、仿真和设计优化是解决这一问题的有效手段。针对上述问题,提出一种 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架,分别利用 MATLAB 的优化计算能力、SolidWorks 的几何建模能力和 ANSYS 的有限元分析能力,以 MATLAB 为主程序,调用 SolidWorks/ANSYS 进行参数化几何建模和仿真分析。该集成框架能将设计人员从重复建模和仿真工作中解放出来。以一种微型飞行器机身的结构设计为例,说明了该方法的有效性。

**关键词** 结构设计优化 几何建模 仿真分析 优化计算 软件集成

中图分类号 TP391 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.03.002

## STRUCTURAL DESIGN OPTIMIZATION BASED ON SOLIDWORKS-MATLAB-ANSYS INTEGRATED FRAMEWORK

Li Jun<sup>1</sup> Yang Yang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(College of Industrial Design, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China)

<sup>2</sup>(Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture, Engineering Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract** In the structural design optimization based on simulation models, multiple geometric modeling and simulation analysis are needed, which requires a lot of work time for the designer. A single software cannot or is difficult to complete the work of the geometric modeling, simulation analysis and optimal computation. It is an effective way to solve this problem to integrate several sorts of software with different functions for parametric modeling, simulation and design optimization of products. In view of the above problems, this paper proposes a SolidWorks-MATLAB-ANSYS integration framework, which respectively utilizes optimization calculation ability of MATLAB, the geometric modeling ability of SolidWorks, and the finite element analysis capability of ANSYS. Taking MATLAB as the main program, we called SolidWorks/ANSYS software for parametric geometric modeling and simulation analysis. The integration framework could liberate designers from repetitive modeling and simulation work. And the effectiveness of the method by taking the structural design of a micro-aircraft fuselage as an example is illustrated.

**Keywords** Structure design optimization Geometric modeling Simulation analysis Optimization Software integration

## 0 引 言

基于仿真的结构设计优化已成为产品设计常用的手段,ANSYS 软件是最为流行的计算机辅助工程(CAE)

软件,在结构有限元分析领域有广泛应用。尽管 ANSYS 也能进行几何建模和优化计算,但其几何建模能力弱,且其提供的优化方法难以收敛到最优解<sup>[1]</sup>。SolidWorks 软件几何建模功能强大、操作简捷,是使用最为广泛的三维几何建模软件之一。MATLAB 软件能

够进行高性能数值计算,其提供了许多内置优化工具箱,也能采用 MATLAB 语言对高效的优化算法进行编程。通常,这些软件是相互独立的系统,有效集成不同功能的软件是综合利用这些优点进行设计优化的关键。

在利用各种软件优点进行设计优化方面已有研究。宋宏伟等<sup>[2]</sup>利用 MATLAB 与 ANSYS 进行数据传递,实现了平面钢框架结构设计优化。方芳等<sup>[3]</sup>利用 MATLAB 数据计算处理能力生成数据点,导入 SolidWorks 生成连续凸轮曲线,由此得到平面凸轮模型。常凯<sup>[4]</sup>通过编程实现 MATLAB 和 ANSYS 程序之间的相互调用,建立了渐开线圆柱齿轮有限元分析软件平台,有效地提高了齿轮副啮合特性分析的效率。马东辉等<sup>[5]</sup>提出了一种分部优化的设计方法,利用 ANSYS 进行结构静力分析,建立优化设计的数学模型,再采用 MATLAB 优化工具箱对模型进行求解。郑帅等<sup>[6]</sup>在 SolidWorks 中建立钢管输送机机构关键部件的三维模型,将三维模型导入到 Ansys Workbench 中进行优化,实现了关键部件的轻量化设计。

这些研究工作均为简单利用两种软件的优点,尚未实现同时集成几何建模软件/仿真分析软件/优化计算软件进行设计优化。此外,在产品优化设计中,需要进行多次(几十次甚至上千次)几何建模和有限元分析,且这些几何建模和有限元分析通常不是一次性完成,而是需要在每次优化迭代后进行新的建模和分析,这需要耗费设计人员大量的时间和精力。

本文提出了一种 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架,能够有效集成这三种软件的优点,实现了参数化建模、仿真和优化计算的一体化,避免了设计人员在设计优化过程中重复的建模和仿真分析工作,对提高设计效率具有重要意义。将该方法与多目标遗传算法相结合,应用于一种微型飞行器机身结构设计优化中,结果表明,本文方法能有效解决类似的结构设计优化问题。

## 1 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架

本文以 MATLAB 作为主程序,将设计变量传入 SolidWorks 进行参数化几何建模,并调用 ANSYS 进行仿真分析。整个优化过程在 MATLAB 环境下编程实现。优化时,程序利用脚本驱动 SolidWorks 软件更新几何模型,并传递到 ANSYS 中进行仿真分析,通过 APDL 命令流自动提取应力等计算结果并通过 MATLAB 读取。SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架如图 1 所示。通过该框架,能够集成三种软件的优点进

行产品的结构设计优化。

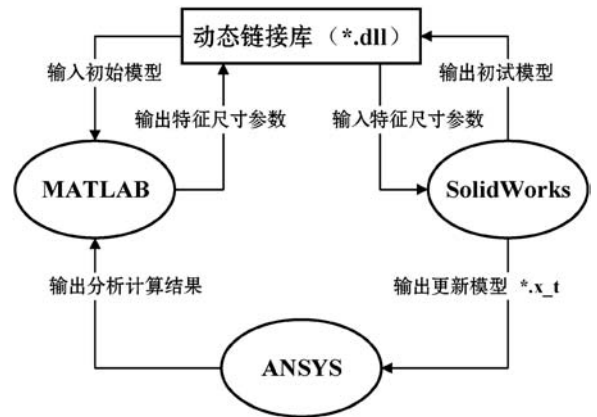


图 1 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架

### 1.1 MATLAB 调用 SolidWorks

实现 MATLAB 与 SolidWorks 交互的目的是改变设计变量来驱动 SolidWorks 更新几何模型。如图 1 所示,采用 Microsoft Visual Studio 2013 的 C#模板编译 SolidWorks 的动态链接库 \*.dll 文件,通过 MATLAB 调用该 \*.dll 文件,可对零件图进行特征的建立、修改及保存等操作。以长方体几何模型为例,创建动态链接库,编译生成 \*.dll 文件。主要相关代码如表 1 所示。

表 1 创建 SolidWorks 动态链接库主要代码

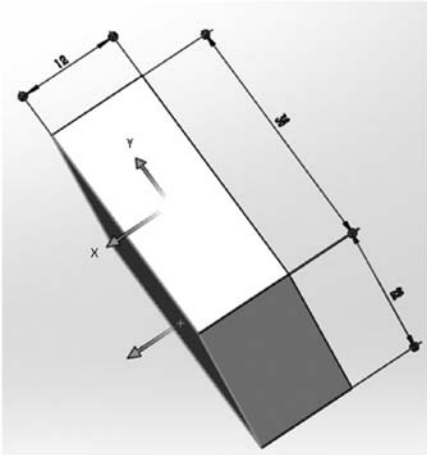
代码	备注
IDimension a,b,c;	a、b、c 为定义的三个尺寸变量
IModelDoc2 modtest = (IModelDoc2) swap. OpenDoc(@"C:\长方体.SLDPR",1);	打开已构建的长方体几何模型“长方体.SLDPR”
String[] s = {"D1@长方体", "D2@长方体", "D1@凸台-拉伸"};	将需驱动尺寸名称“D1@长方体”,“D2@长方体”,“D1@凸台-拉伸”存储在字符串 s 中
a = (IDimension) modtest. Parameter(s[0]);	将需驱动的尺寸“D1@草图 1”赋值给尺寸变量 a
b = (IDimension) modtest. Parameter(s[1]);	将需驱动的尺寸“D2@草图 1”赋值给尺寸变量 b
c = (IDimension) modtest. Parameter(s[2]);	将需驱动的尺寸“D1@凸台-拉伸 1”赋值给尺寸变量 c
a.Value = L;	将尺寸驱动参数 L 赋值给尺寸变量 a
b.Value = W;	将尺寸驱动参数 W 赋值给尺寸变量 b
c.Value = H;	将尺寸驱动参数 H 赋值给尺寸变量 c
modtest.EditRebuild3();	用新的尺寸驱动参数重新构建长方体几何模型

由此,通过修改长方体特征尺寸长宽高可以驱动 SolidWorks 更新几何模型。MATLAB 驱动 \*.dll 文件调用 SolidWorks 的主要代码如表 2 所示。

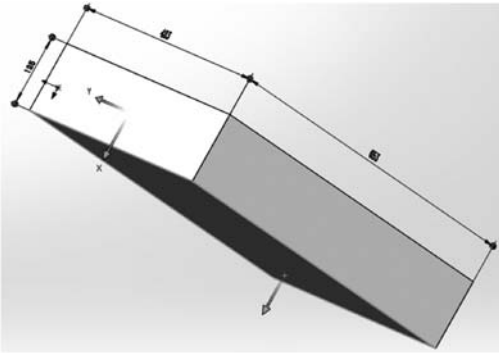
表 2 MATLAB 中设计变量驱动 SolidWorks 更新几何模型代码

代码	备注
NET.addAssembly ('C:\cft.dll');	打开 dll 文件 'C:\cft.dll'
CallSld.CFT.alter ('C:\长方体.SLDPRT', 'C:\123.x_t', L,W,H)	更新几何模型的特征尺寸 L、W、H,并存储为 x_t 格式模型图

长方体几何模型的更新过程如图 2 所示,(a)为初始长方体几何模型,(b)为更新后的长方体几何模型。



(a) 初始几何模型图



(b) 更新后的几何模型图

图 2 长方体几何模型的更新过程

### 1.2 ANSYS 调用 SolidWorks 模型

通过 ANSYS 参数化设计语言 (ANSYS Parametric Design Language, APDL) 可以读取 SolidWorks 几何模型,在此基础上,实现网格划分、施加载荷和有限元求解。读取 SolidWorks 几何模型实际上是读取 \*.x\_t 文件,代码如表 3 所示。

表 3 APDL 语言读读取 SolidWorks 几何模型代码

代码	备注
~PARAIN,'123','x_t', 'C:\cft',SOLIDS,0,0	ANSYS 读取 'C:\cft' 路径下的几何模型文件 '123.x_t'

### 1.3 MATLAB 与 ANSYS 交互

MATLAB 与 ANSYS 的交互主要包括两部分:(1) MATLAB 调用 ANSYS,利用 ANSYS 编写好的 APDL 代码和批处理功能进行有限元分析计算<sup>[2]</sup>;(2) ANSYS 将仿真分析结果写入一个文本文件 \*.txt,供 MATLAB 读取。MATLAB 调用 ANSYS 进行仿真分析和读取 ANSYS 仿真结果数据的主要代码如表 4 所示,ANSYS 将仿真结果写入文本文件 \*.txt 的代码如表 5 所示 (以输出仿真模型的最大应力为例)。表 4 中,ANSYS 程序所在的目录为作者实际使用的目录,其他文件所在的目录为当前工作目录。

表 4 MATLAB 调用 ANSYS 进行仿真计算主要代码

代码	备注
system('D:\ANSYS17.0\ANSYS Inc\v170\ansys\bin\win64\ANSYS170' -b -p ane3fl-i 'CFT.txt' -o "111.txt');	-i 为输入文件 (ANSYS 分析文件);-o 为输出文件
Rfid = fopen('output.txt','r+');	打开 output.txt
Rtline = fgetl(Rfid);	/
f = sscanf(Rtline,'%f');	完成数据的读取
fclose(Rfid);	关闭 output.txt 文件

表 5 ANSYS 将仿真结果写入文本文件主要代码

代码	备注
*CFOPEN,output.txt	打开 output.txt
*vwrite,max_eqv	写入最大应力 max_eqv 到 output.txt
(F6.2)	读取数据的格式
*CFCLOS	关闭 output.txt

针对 1.1 节中的长方体实例,通过 MATLAB 调用 ANSYS,对更新后的长方体几何模型划分网格,施加载荷,并进行应力分析,仿真结果如图 3 所示。

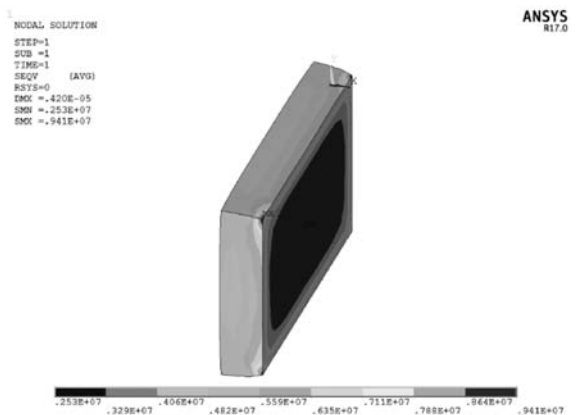


图 3 长方体几何模型的仿真结果

## 2 结构优化算例

将本文提出的方法与多目标遗传算法相结合,应

用于微型飞行器 (micro-aerial vehicle, MAV) 机身结构设计优化中,以验证本文方法的有效性。本文方法与多目标遗传算法相结合的示意图如图 4 所示。

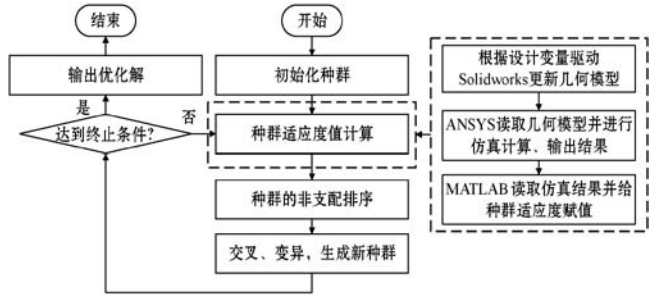


图 4 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架与多目标遗传算法结合示意图

MAV 不同于传统概念上的飞机,如图 5 所示。它具有足够小的尺寸、足够的巡航范围和飞行时间,并且能够传输实时图像、执行其他功能。MAV 被认为是未来战场上的重要侦察和攻击武器,能以可接受的成本执行某一有价值的任务。



图 5 微型飞行器

为了适应不同条件下的任务需要,MAV 的机身和机翼应采用轻质材料制造,使其具有更高的耐受力和起飞、着陆的能力。本节将重点讨论 MAV 机身的结构设计优化,选用轻型 ABS 材料进行设计。机身的几何模型如图 6 所示,其初始几何参数和材料属性如表 6 所示。图 7 给出了机身的受力及边界条件。机身总共受到三个力的作用:前部发动机的重量  $F_{Motor} = 5.9 \text{ N}$ 、尾部的重量  $F_{Tail} = 2.7 \text{ N}$  以及机身内表面的分布载荷  $F_{Payload} = 0.1 \text{ N/mm}^2$ 。其中,前两个力被简化为作用在各自重心处的集中载荷,在 ANSYS 中是利用无重量的刚性链接单元将集中载荷传递到机身。机翼的重量很小,可以忽略不计。机身底部的小区域是固定的,以模拟机身着陆或坠毁时的接触区域。

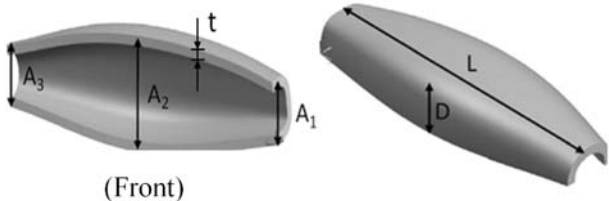


图 6 MAV 机身几何模型

表 6 MAV 机身的设计变量及其范围

设计变量	变量范围/mm
$A_1$	[46.0,50.0]
$A_2$	[85.0,95.0]
$A_3$	[40.0,46.0]
$D$	[40.0,50.0]
$L$	[250.0,260.0]
$t$	[6.0,8.0]

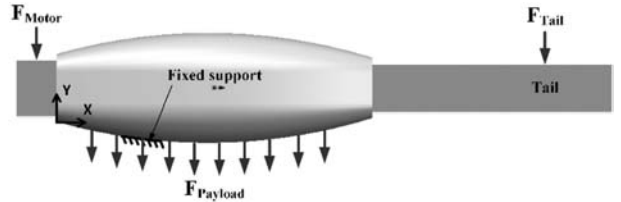
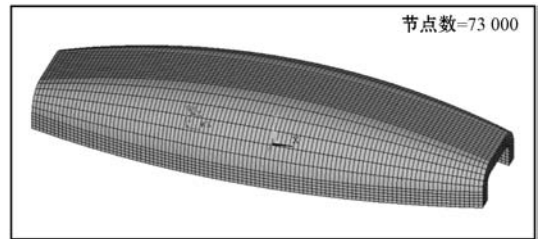
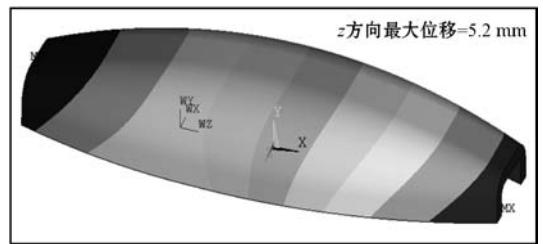


图 7 MAV 机身的受力及边界条件

本节选取的仿真模型含有 73 000 个节点,在某一组参数下的仿真模型和仿真结果如图 8 所示。



(a) 仿真模型



(b) 仿真结果

图 8 MAV 机身的仿真模型和仿真结果

MAV 机身设计的目标是最小化体积与 z 方向上的最大变形,同时保证最大应力不超过 40 MPa。该优化问题可以表示为:

$$\min f_1 = V(A_1, A_2, A_3, D, L, t)$$

$$\min f_2 = \max\_u_z(A_1, A_2, A_3, D, L, t)$$

$$\text{s. t. } g_1 = \sigma \leq 40 \text{ MPa}$$

$$\text{where } 46 \text{ mm} \leq A_1 \leq 50 \text{ mm}; 85 \text{ mm} \leq A_2 \leq 95 \text{ mm};$$

$$40 \text{ mm} \leq A_3 \leq 46 \text{ mm}; 40 \text{ mm} \leq D \leq 50 \text{ mm};$$

$$250 \text{ mm} \leq L \leq 260 \text{ mm}; 6 \text{ mm} \leq t \leq 8 \text{ mm}$$

以 MATLAB 为主程序,采用 NSGA-II 算法<sup>[7]</sup>进行优化计算,设定种群数量为 40,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,遗传代数为 100 代。优化结果如图 9 所示。

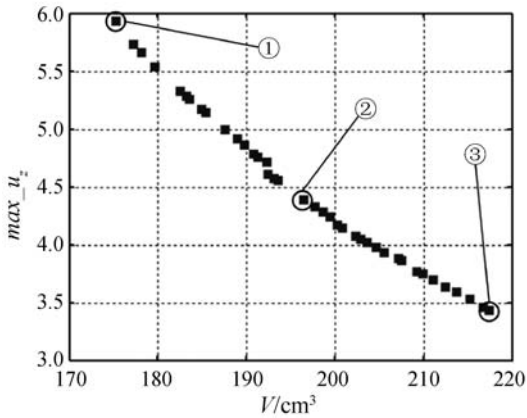


图9 MAV机身多目标设计 Pareto 解集

由于多目标设计优化的结果为 Pareto 解集<sup>[8]</sup>,设计人员可以根据实际情况和需求在 Pareto 解集中选择设计方案<sup>[9]</sup>。表7列出了图9中标注的三个典型设计点处的设计变量和目标值,点1和点3分别表示注重最小化体积和最小化最大变形,点2代表权衡最小化体积和最小化最大变形。

表7 三个典型设计点处的设计变量和目标值

点	设计变量	体积	z方向最大变形
1	[47.11 85.03 41.30 41.30 252.00 6.27]	175.26	5.94
2	[48.87 85.10 41.89 40.02 250.52 7.12]	196.49	4.39
3	[48.62 85.20 41.33 40.00 250.00 8.00]	217.36	3.43

以本文使用的遗传算法为例,需要几千次的建模和仿真计算才能得到该多目标设计优化问题的 Pareto 解集。采用本文提出的设计优化框架,设计人员只需要进行一次建模和仿真,其他的重复工作可以全部由计算机通过集成三种软件完成,显然计算机采用参数化的方式进行建模和仿真,比人工进行效率更高。

### 3 结语

本文充分利用三种软件的优势,提出一种 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架,实现了参数化建模/仿真和优化计算,由计算机代替设计人员完成大量的重复建模、仿真工作,有效提高了设计效率。本文的方法被成功应用于一种微型飞行器机身的结构设计优化中。

此外,进化算法(如遗传算法、粒子群算法等)因具有高鲁棒性和广泛适用性,被广泛应用于全局优化中。但其需要大量的函数调用,即便采用参数化建模/仿真和优化计算,也需要大量的时间,尤其对于复杂产

品的设计优化,其计算成本难以接受。代理模型技术是解决这一问题的有效手段,下一步工作将研究将代理模型技术与本文提出的 SolidWorks-MATLAB-ANSYS 集成框架相结合,进一步提高结构设计优化的效率。

### 参考文献

- [1] Park H S, Dang X P. Structural optimization based on CAD-CAE integration and metamodeling techniques[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(10): 889-902.
- [2] 宋宏伟,刘浩. 基于 MATLAB 与 ANSYS 的结构优化设计[J]. 大连民族大学学报,2011,13(3):284-287.
- [3] 方芳,黄松和,林刚. 基于 MatLab 和 SolidWorks 的凸轮轮廓设计及性能分析[J]. 矿山机械,2010(6):39-42.
- [4] 常凯. 一种渐开线齿轮啮合特性分析的参数化求解方法研究[J]. 机械工程师,2017(8):94-96.
- [5] 马东辉,赵东. 基于 ANSYS 和 MATLAB 的结构优化设计[J]. 制造业自动化,2013(19):106-108.
- [6] 郑帅,柴晓艳,刘锡军,等. 基于 SolidWorks 和 Ansys Workbench 的钢管输送机构关键部件的优化设计[J]. 起重运输机械,2016(6):7-11.
- [7] Nguyen J, Park S, Rosen D. Heuristic optimization method for cellular structure design of light weight components[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(6): 1071-1078.
- [8] Shan S. An efficient pareto set identification approach for multiobjective optimization on BlackBox functions[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(5):279-291.
- [9] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182-197.
- [10] 舒乐时,周奇,蒋平,等. 基于序贯 Kriging 模型的潜器型线优化设计[J]. 船舶工程,2016(9):43-46.

### (上接第7页)

- [17] Ming J, Pan M, Gao D. iBinHunt: Binary hunting with inter-procedural control flow[C]//International Conference on Information Security and Cryptology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: 92-109.
- [18] Zhang H, Qian Z. Precise and accurate patch presence test for binaries[C]//27th USENIX Security Symposium (USENIX Security 18). 2018: 887-902.
- [19] Unicorn Engine[EB/OL]. [2018-08-01]. <https://www.unicorn-engine.org>.
- [20] Bartholomew D. Qemu: a multihost, multitarget emulator[J]. Linux Journal, 2006, 2006(145): 3.
- [21] CveDetails[EB/OL]. [2018-08-01]. <https://www.cve-details.com/product/47/Linux-Linux-Kernel.html>.
- [22] CVSS[EB/OL]. [2018-08-01]. <https://www.first.org/cvss/specification-document>.