

基于实例的汽车螺纹连接设计及校核平台开发

扈光烨

(中国重型汽车集团有限公司 山东 济南 250100)

摘要: 随着汽车的普及程度不断提高,在汽车上出现螺纹连接失效的情况时有发生,而螺纹连接夹紧力的设计与控制将直接影响汽车使用的安全性与可靠性。当前大部分汽车制造商在设计时采用了相同的螺纹连接方法,并进行了整车的耐久性试验。这一方法不但效率低下,而且还增加了开发费用。本文针对客户反馈及汽车主机厂的实际情况,考虑到对螺纹连接夹紧力的要求,运用VDI 2230的计算方法,对汽车螺纹连接进行了可靠性设计与检验。

关键词: 汽车螺纹; 连接设计; 校核平台开发

1 汽车变速箱悬挂系统实例模型导入

1.1 汽车悬挂系统简介

悬挂系统是车辆的动力总成与车身之间的一种联系,其主要功能是将动力总成传递给车身的震动降到最小^[1]。汽车常用的悬挂方式有三点式悬挂和四点悬挂,最常用的是三点式悬挂^[2,3],三点悬挂的优势在于无论汽车如何摇晃、颠簸,都能构成一个坚固的三角形,保证动力总成在有限的空间里平稳地移动。

1.2 汽车变速箱悬挂系统螺纹连接点导入

本文选择了某轿车的某种型号的动力总成悬挂装置作为实例。这是一种经典的三点式悬挂^[4],文中给出了一种基于曲线加载的CAE方法,并结合实例进行了结构的选择与计算。

1.3 汽车变速箱悬挂系统的载荷分析

本文介绍了一种汽车左齿轮悬挂系统,并以悬挂在齿轮箱支架上的三个螺钉作为实例,讨论了该螺钉固定装置的设计、计算和检验。

这里的三个螺钉排列成一个三角形,每个螺钉的应力都是不一样的。在频谱的获取中,通常会在悬挂装置上安装一个加速传感器,并依据各个零件的重量,利用数学方法计算出各个零件受到的外荷载。该作用力仅为感应器安装位置所受到的作用力。

通常,路谱资料的收集将在各种路况下进行,可划分为传统工况、疲劳工况、极限工况以及冲突工况。利用CAE软件对各种工况下的路面试验所获取的路面谱图进行有限元分析,对无传感器位置处的应力状态进行仿真,得到相应的应力解析,CAE小组将其转换成各种工作状态,其应力分布如表1所示。

三根螺钉的受力不同,其中一根断裂,就会对其余的螺钉造成一定的损伤。为此,选择了同一种螺

表1 变速箱悬挂点在不同工作状态下的受力情况 / N

项目	载荷分析	X分力	Y分力	Z分力
常规 工况	全油门向后加速 + 加速度 0.6g	6640	74	983
	全油门向前加速 + 加速度 0.5g (1档)	-5886	23	815
	向右转弯 (Y向加 速度 1.5g)	-84	3355	569

钉,根据其承载能力进行了设计。从以上CAE的计算可知,该节点最大的外力发生在撞击状态,并以切线为主。本文所采用的简化模式为同轴夹持与同轴受力。

1.4 汽车变速箱悬挂系统螺栓连接设计计算

根据路谱的资料,发现变速箱悬挂位置的最大载荷是由外侧侧向力引起的,而最大载荷出现在碰撞状态。在这一点上,切线负荷是X向与Y向作用力的合力:

$$F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} = \sqrt{14876^2 + (-19)^2} = 14876 \text{ (N)} \quad (1)$$

三个螺钉在悬挂托架上呈环状分布,共同承受侧向荷载。所以,设计计算中使用 F_{\max} :

$$F_{\max} = \frac{14876}{3} = 4958 \text{ (N)} \quad (2)$$

1.4.1 初定公称直径

根据VDI 2230标准,考虑到螺栓接头的主要受力,采用 F_{\max} 法进行设计,其负载值在4000~6300N;以较高的负载为设计输入,即6300N,增加4个水平负载,采用力矩扳手进行转动;所以选择M14×2的粗齿形螺栓,强度等级为10.9,采用SCM435合金(与国家标准35CrMo相对应)。

在螺钉的基础资料选定后,为了防止反复开模,在公司零件库里选择了六边凸缘的螺钉。

1.4.2 确定拧紧系数 a

在各大主机厂，变速箱悬挂接头通常都是用电动扭力扳手和动态转矩测量来实现。依据 VDI 2230 中的各种材料的表面和润滑状况来确定其摩擦力等级的参考值。一般情况下，汽车螺纹紧固件的摩擦系数在 0.10 至 0.16 之间，故其摩擦系数是 B 级。与 VDI 2230 的建议相比较，螺纹系数 a 为 1.8。

1.5 拧紧方式确定

在确定了扭力后，采用适当的方法来实现它的安装，这包括了特定的拧紧方法。在汽车工业中，一般采用转矩控制法、转角法和屈服点控制法。不同的螺钉方法都有其优点和不足，并且在不同的螺钉压力下，其精确性也不尽相同。

1.5.1 转矩控制法

扭力控制是最常见和最简便的一种，80% 的汽车螺丝接头都是用这个方法进行的。这是一种在紧固转矩达到目的转矩后马上停止的一种控制方式。由于夹紧力 $F=T/kd$ ，因此夹紧力 F 和转矩 T 成正比，从而可以间接地控制夹紧力。但是，因为在一些地方通常使用的是力矩系数 k ，在现实中并非一个恒定的常数，不同的零件批次，不同的加工条件，不同的接头弹性系数，都会引起微小的波动。力矩控制方法的不足之处是：螺杆的轴向夹持力控制精度不高，且受摩擦系数的影响，使其无法发挥其潜能。

1.5.2 转矩转角法

转矩转角法是以转矩控制为基础，在旋入临界力矩后，从该点起，再以预定的角度旋转。因为第二阶段的控制角度的过程实际上是对螺栓的延伸进行控制，所以对摩擦系数 k 的影响不再存在，从而极大地提高了螺钉的夹紧力控制的准确性。但由于增加了一个控制和监测角度的传感器，因此，转矩转角法的组装费用远高于转矩控制，因此，这种方法仅适用于汽车底盘的某些关键部位。由于汽车变速器的悬挂接头是底盘的重要部位，它对夹紧力的精确控制有很大的要求，所以在拧紧方法上必须采用转矩转角方法。在本文中，本文所计算的紧固力矩 $M_a=172\text{Nm}$ ，可以用实际的试生产曲线转换成扭力角度。

1.5.3 屈服点控制法

屈服点控制法是一种将螺栓拧到屈服点后就能停止的高精度旋紧方法。屈服点控制方法是利用螺杆装置，对力矩 - 角曲线进行连续的计算，通常以倾角曲线的坡度降低到 50% 以上时，即为最后的停机。由于材料的屈服强度具有较高的一致性，所以这种旋压方法对夹紧力的精确控制具有很高的准确性，目前仅在部分发动机关键连接点使用过。

2 汽车螺纹连接设计校核平台开发

2.1 螺纹连接校核方法

当前业界普遍采用的检查方式为紧固试验和汽车耐久性试验。螺纹试验是用真实的部件来进行装配的。按试验目的，可分为扭断试验和超声轴力试验两种。该方法的优势是能够很好地反映出实际装配过程，并根据试验结果曲线进行分析。初始力矩的设计是由屈服点分析来检验。螺纹连接试验由一组传感器和分析软件组成，进而得出转矩 - 转角 - 轴力的关系图。

2.2 校核平台的需求

螺纹连接检验工作比较繁琐，但由于接头部位的差异，检验的方式也大相径庭。若能搭建一个标准化的测试平台，以零件表面的磨损等物理参量为背景资料，并依据螺钉的接头形式，调用对应的数学模式进行计算；最后得出检验的结论，从而降低了手工计算的工作量，并大大地加快了对产品质量的检验。

目前，国内、外主要的汽车制造厂还没有建立起一套统一的系统，大多数的主机厂都把螺纹连接的设计审核交给了紧固件小组，由各个公司的具体需求和 Excel 工作表相结合；编制了一组计算表，构成了一个简单的检验平台。基础部分的计算是在 VDI 2230 上进行的，再加上各个公司的安全标准，可以满足大多数的测试和验证。该系统必须具有使用方便、用户界面良好的特性。由于评价结果是检验工作的结果，必须对其进行归类，以便以后的查询，所以，可产出的报表也是检验系统必须具有的一项重要的职能。现在，以 Excel 的超强计算性能，可以完成上述各项工作。

2.3 校核平台的结构及界面

在构建校验系统前，必须先构建一个可在校验中使用的数据库和方程式库。该资料库包括了各种螺纹的基本信息，材料性能参数，应力计算公式，以及计算安全因子的公式。此资料库必须是可编辑的，以便于日后持续改进与升级。一般来说，在 Excel 中使用的是各种工作表格，每一个单位都有相应的资料，方便了资料的处理，防止因资料被误引而导致的运算误差。

其次，对测试平台的使用要求是友好的。操作接口与使用者可以直接进行互动，因此简洁是一个很重要的考量因素。复杂的操作界面会使使用者感到疲倦，同时也会导致资料的丢失。而事实上，在螺纹联接操作中，所需要的资料数量非常庞大，这一点从上面的计算程序就能看得出来。所以，多层菜单接口就是一个很好的解决方法，它可以确保界面的简洁。

校验平台的最后输出是校验报告，校验平台需要有自动生成的结果报表。通常，对于螺纹连接，报告的

结果有两类: PASS (合格) 和 FAILED (不合格)。在此基础上, 通过一系列的计算结果和相应的安全系数进行了比较。当检验结果为 FAILED 时, 应根据实际情况对设计输入进行修正, 并在反复试验中寻找最佳设计效果。这也是检验平台最大的优点, 当发现原有设计存在问题时, 可以迅速进行修正, 得到符合要求的设计参数。

平台的基础数据必须具有完整性和独特性。在进行验证计算时, 需要在底层数据库中提供有关企业的全部产品和物料的基本资料。为了防止在以后的校核中出现同一字段导致的数据引用误差, 从而使计算精度下降, 在完成了底层数据库的整理后, 根据前面所述的验证平台的要求, 必须将复杂的运算流程放在后台, 而在前端采用一个简单的操作接口来进行交互; 这就要求使用 Excel 的宏函数。通过 Excel 中的 VBA 语言编写, 可以在 Excel 中执行一系列的命令, 以取代手工, 自动完成大量的重复任务, 从而提高运算速度。这个程式码的执行会出现一个简单的互动视窗。

2.4 试验验证

某汽车在某一次结构耐久测试中, 曾有一次异常响动, 经过测试员检验, 发现其上的刻痕标志已经偏离, 并发现自锁式螺丝松动。拆卸时, 发现球形销钉上的螺钉已经磨破, 螺丝配合件失去了卡扣作用, 卡箍力量不足, 无法抵御外界负荷引起的滑动。

该节点具有很高的安全性, 需要对其进行更深入的检验。为了确认系统的转矩, 通常采用转矩失效试验 (Torque To Failure Test) 和超声夹紧力进行检测, 如表 2 所示。

通过对 6 个试验样品进行比较, 结果表明: 第一次改变后, 螺帽的夹紧力得到明显提高, 该接头的抗松性能明显增强。其次, 变更后, 整个接头的屈服力矩上升, 进而使新螺母更加安全。

表 2 前测试结果数据

样本编号	最大转矩 /Nm	屈服转矩 /Nm	最大夹紧力 /kN	屈服夹紧力 /kN
1#	209.63	194.77	130.73	103.34
2#	209.24	192.92	129.65	111.80
3#	199.56	187.73	127.84	115.54
4#	196.58	178.42	127.14	113.77
平均值	203.75	138.46	128.84	111.11
标准差	5.78	6.35	1.42	4.68
X+3a	221.10	207.50	133.11	125.15
X-3a	186.41	169.42	124.57	97.08

3 结语

利用 Excel 编程语言编制了一种用于螺纹联结节点的验算系统, 实现了对螺纹联结节点的验算工作的方便和交互式。通过对节点扭力试验和台架耐久性试验的检验, 表明了所设计的试验台是可行的、可靠的。当造价受到限制时, 采用此平台可以替代汽车的耐久性试验。

参考文献:

- [1] 檀志远, 陈滨, 徐俊梅, 等. 基于视觉识别的车轮拆卸机械手末端执行器的设计 [J]. 南方农机, 2022, 53(11): 1-3+15.
- [2] 王昌健, 蒋国璋, 段现银. 基于文本数据挖掘的复杂工况螺纹连接力矩衰减预测方法 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2021, 40(02): 142-151.
- [3] 杨志兵, 李曼丽. 基于知识重用的钳臂快速设计方法 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(02): 223-227+259.
- [4] 卢伟. ANSYS Workbench 二次开发在汽车稳定杆 CAE 分析中的应用 [J]. 汽车零部件, 2014(05): 65-67.

作者简介: 扈光桦 (1985.01-), 男, 汉族, 山东济南人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 汽车装配。