

大型游乐设施加速度评价方法研究

王 坤, 邢海军, 张林浩, 徐梦超

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:通过一系列数学方法对大型游乐设施加速度的评价方法展开研究,简单有效地判断出各方向加速度及组合加速度是否满足国家标准要求。首先,对国家标准中关于大型游乐设施加速度的要求进行描述与分析;然后,重点针对单方向侧、垂向加速度、0.3 s 时间差内侧、垂向加速度组合以及同一时刻侧、垂向加速度组合提出评价方法;最后,将此评价方法应用到国内某过山车上,验证了这种评价方法的可行性。这种评价方法能够为国内大型游乐设施加速度的判断提供参考依据。

关键词:大型游乐设施;加速度;持续时间;加速度组合;过山车

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)04-0063-06

随着经济的快速发展,在满足物质需求的同时,越来越多的人喜欢走进游乐场去体验游乐设施带来的精神享受,过山车、大摆锤、海盗船等大型高速、高刺激游乐设施尤其受到年轻人的追捧。但是大型游乐设施具有它的特殊性,必须要有严格的标准以保证其安全可靠,其中加速度就是一项十分重要的指标,超重、失重、冲击、振动等都可以通过加速度反映,适当的加速度可以刺激乘客的感官并带来精神上的愉悦,但是过大的加速度会对人体造成不适或伤害,严重的会造成意识、视觉等功能的改变或丧失^[1]。

GB 8408—2018《大型游乐设施安全规范》^[2](以下简称《规范》)对大型游乐设施的加速度有明确规定,但并没有提出加速度的评价方法。《规范》中关于加速度的规定包括 X、Y、Z 单方向加速度要求和侧、垂向加速度组合要求。其中,侧、垂向加速度组合又分为侧、垂向加速度在 0.3 s 时间差内承受的最大加速度组合,和同一时刻的侧、垂向加速度组合。目前,已经有许多学者对游乐设施加速度的判定方法开展研究,主要是针对单方向加速度和同一时刻侧、垂向加速度组合提出的判断方法,并没有提出与侧、垂向加速度有关的持续时间的判断方法,以及侧、垂向加速度在 0.3 s 时间差内承受的最大加速度组合的评价方法^[1-6]。

为解决上述问题,根据《规范》中对大型游乐设施加速度的要求,分析研究了一整套加速度的评价方法,并以国内某单轨过山车为例,对其某个座椅的加速度做了详细评价。这种评价方法能有效解决以往加速度判定不明确、不全面等问题,提高大型游乐设施的设计安全性,使其在虚拟仿真阶段发现问题并及时解决,有效降低设计、制造成本。

1 单方向加速度评价方法

《规范》中规定计算或测量加速度的参考点一般应在席座上方 600 mm 处(或成人心脏大概位置),人体空间坐标系见图 1。

1.1 x 方向加速度评价

《规范》中规定 +x 方向的最大加速度不超过 6g, -x 方向的最大加速度不超过 3.5g。故只要 x 方向的加速度值满足 $-3.5g \leq a_x \leq 6g$,即符合要求。

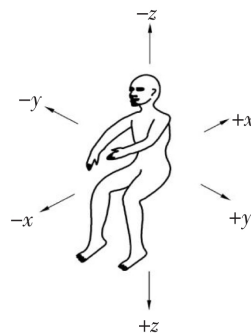


图1 人体空间坐标系

收稿日期:2019-10-09 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20190165

作者简介:王坤(1986—),男,硕士研究生,研究方向为机械设计及理论。E-mail:kunan0526@163.com

王坤,邢海军,张林浩,等.大型游乐设施加速度评价方法研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):63-68.

1.2 y 方向加速度评价

《规范》中规定侧向(y 方向)的加速度应符合图 2 要求。

如图 2 所示,若所有 y 方向加速度 $|a_y| \leq 2g$,则可以判断其在 y 方向的加速度满足要求;若存在某时刻 $|a_y| > 3g$,则可以判断其在该时刻的 y 方向加速度不满足要求;若出现某一时刻的 $2g < |a_y| \leq 3g$,需要单独判断其持续时间 Δt :必须满足 $0.05 \text{ s} \leq \Delta t \leq 0.2 \text{ s}$,且 $|a_y| \leq \frac{10}{3}(1-2\Delta t)g$,

才可判定其符合要求。

1.3 z 方向加速度评价

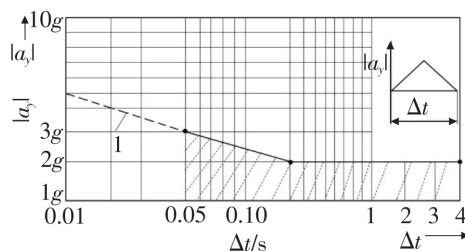
《规范》中规定垂向(z 方向)的加速度应符合图 3 要求。

如图 3 所示,若所有 z 方向加速度 $-1.5g \leq a_z \leq 4g$,则可以判断其在 z 方向的加速度满足要求;若某时刻 $a_z > 6g$ 或 $a_z < -2g$,则可以判断该时刻的 z 方向加速度不满足要求;若出现某时刻 $4g < a_z \leq 6g$ 或 $-2g \leq a_z < -1.5g$,需要单独判断其持续时间 Δt 。

当 $4g < a_z \leq 6g$ 时,若 $0 \leq \Delta t \leq 1 \text{ s}$,则满足要求;若 $1 \text{ s} \leq \Delta t \leq 2 \text{ s}$,必须满足 $a_z \leq (8-2\Delta t)g$;若 $\Delta t > 2 \text{ s}$,不满足要求。

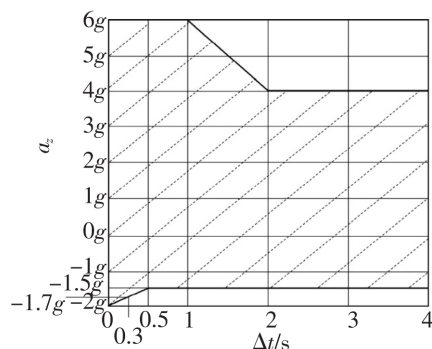
当 $-2g \leq a_z < -1.5g$ 时,必须满足 $0 \leq \Delta t \leq 0.5 \text{ s}$,且 $a_z \geq (\Delta t - 2)g$;若 $\Delta t > 0.5 \text{ s}$,不满足要求。

综上所述,单方向加速度的评价方法流程可以总结为图 4。



注:1 为频率 10 Hz 以上的区域; Δt 为加速度持续时间;大于 4 s 的区域尚未证实,需进一步测试;阴影部分为允许的加速度。

图 2 与持续时间有关的允许加速度 a_y



注:大于 4 s 的区域尚未证实,需进一步测试; Δt 为加速度持续时间;阴影部分为允许的加速度。

图 3 与持续时间有关的允许加速度 a_z

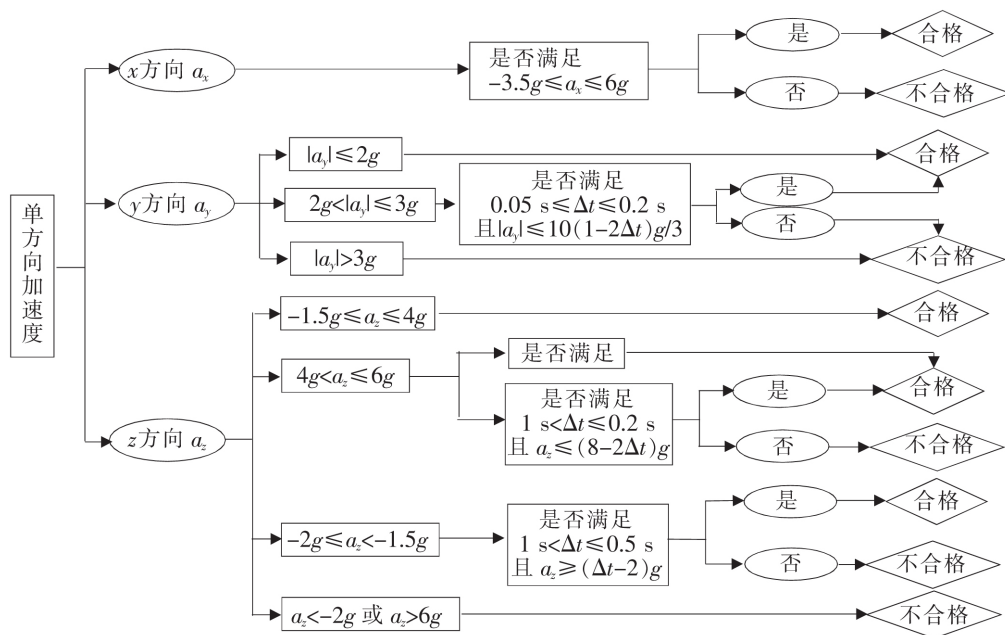


图 4 单方向加速度评价方法流程图

1.4 加速度持续时间 Δt 的判断方法

通过加速度时间历程图观察加速度超出允许值的连续点数,用超出允许值的连续点数乘以采样间隔即为超出允许值的持续时间。

假设 y 向加速度的采样间隔为 0.05 s ,在 $1\sim 1.25\text{ s}$ 之间其加速度为 $1.8g$ 、 $2.5g$ 、 $2.2g$ 、 $2.3g$ 、 $2.1g$ 、 $1.9g$,连续超出允许值 $2g$ 的点数为 4,则可以判断在 $1.05\sim 1.2\text{ s}$ 的 0.2 s 时间内 $|a_y| \geq 2.1g$,也可以表示为 y 向加速度 $|a_y|$ 为 $2.1g$ 的持续时间为 0.2 s ,由图 2 可知,持续时间为 0.2 s 时对应的加速度为 $2g$,故该段时间的 y 向加速度不符合要求。

2 加速度组合评价方法

2.1 0.3 s 时间差内侧垂向最大加速度组合

根据《规范》要求,当同时存在侧向加速度和垂向加速度时,在 0.3 s 时间差内出现的最大侧、垂向加速度值还应满足图 5 要求。其中, a_y 、 a_z 是在 0.3 s 时间差内出现的最大侧向、垂向加速度值, $[a_y]$ 、 $[a_z]$ 为侧向、垂向加速度允许值。

图 5 表示某个时刻的侧向(或垂向)加速度 a_y (或 a_z)与同一时刻前后 0.3 s 内对应的最大垂向(或侧向)加速度 a_z (或 a_y)的组合。例如在 10 s 时侧向加速度为 a_y ,要与 $9.7\sim 10.3\text{ s}$ 时间内最大的垂向加速度 a_z 进行组合,而 10.1 s 时的侧向加速度要与 $9.8\sim 10.4\text{ s}$ 时间内最大的垂向加速度进行组合,以此类推。

从图 5 可以看出允许值(阴影部分)的数学表达式为

$$\begin{cases} \frac{a_y}{[a_y]} < 1 - \frac{1}{3} \frac{a_z}{[a_z]}, & 0 \leq \frac{a_z}{[a_z]} < 0.3 \\ \frac{a_y}{[a_y]} < 1.2 - \frac{a_z}{[a_z]}, & 0.3 \leq \frac{a_z}{[a_z]} < 0.9 \\ \frac{a_y}{[a_y]} < 3 - 3 \frac{a_z}{[a_z]}, & 0.9 \leq \frac{a_z}{[a_z]} < 1 \end{cases} \quad (1)$$

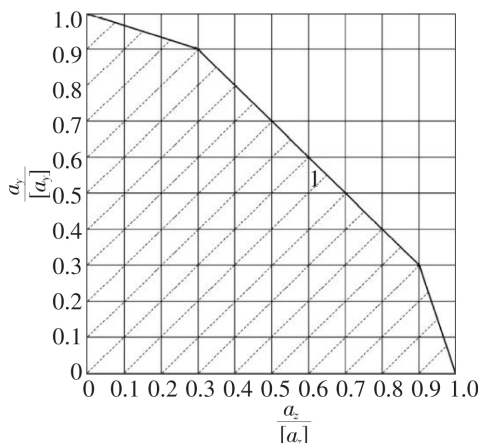
设仿真步长为 t ,故 0.3 s 对应的步数为 $0.3/t$,提取的侧、垂向加速度共 n 组,其中侧向加速度值为 $a_{y1}, a_{y2}, \dots, a_{yi}, \dots, a_{yn}$,垂向加速度值为 $a_{z1}, a_{z2}, \dots, a_{zi}, \dots, a_{zn}$ 。若以垂向加速度为基准,找对应时刻的侧向加速度前后 0.3 s 内的最大值,通式总结为

$$\begin{cases} \frac{\max\{a_{y(i-\frac{0.3}{t})}, \dots, a_{yi}, \dots, a_{y(i+\frac{0.3}{t})}\}}{[a_y]} < 1 - \frac{1}{3} \frac{a_{zi}}{[a_z]}, & 0 \leq \frac{a_{zi}}{[a_z]} < 0.3 \\ \frac{\max\{a_{y(i-\frac{0.3}{t})}, \dots, a_{yi}, \dots, a_{y(i+\frac{0.3}{t})}\}}{[a_y]} < 1.2 - \frac{a_{zi}}{[a_z]}, & 0.3 \leq \frac{a_{zi}}{[a_z]} < 0.9 \\ \frac{\max\{a_{y(i-\frac{0.3}{t})}, \dots, a_{yi}, \dots, a_{y(i+\frac{0.3}{t})}\}}{[a_y]} < 3 - 3 \frac{a_{zi}}{[a_z]}, & 0.9 \leq \frac{a_{zi}}{[a_z]} < 1 \end{cases} \quad (2)$$

侧、垂向加速度允许值 $[a_y]$ 、 $[a_z]$ 与持续时间有关,由于 $[a_y]$ 、 $[a_z]$ 是组合评价的分母,故其值越小, $a_y/[a_y]$ 和 $a_z/[a_z]$ 的值越大,则越接近允许值的边界。故若 $[a_y]$ 、 $[a_z]$ 取最小值时,组合值在允许范围内,则 $[a_y]$ 、 $[a_z]$ 取持续时间对应的值时其组合值也必在允许范围内。所以,根据图 2、图 3 所示, $[a_y]$ 取最小值 $2g$, $[+a_z]$ 取最小值 $4g$, $[-a_z]$ 取最小值 $-1.5g$ 。若有超出允许范围的值,要单独对该值进行分析,找到对应的数值和时刻,根据具体的持续时间重新确定加速度允许值 $[a_y]$ 、 $[a_z]$,再将其代入重新计算,判断其值是否在允许范围内。

2.2 同一时刻的侧垂向加速度组合

同一时刻的侧、垂向加速度组合允许加速度应满足图 6 要求。



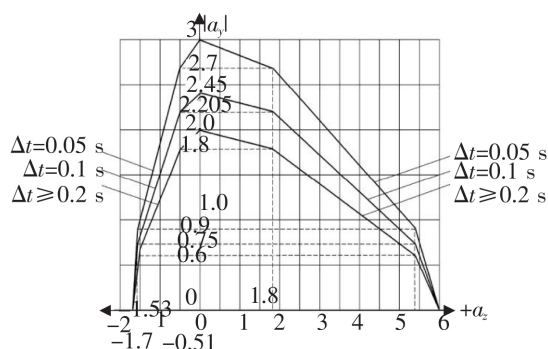
注:划斜线的阴影部分为允许的区域。

图 5 加速度 a_y 和 a_z 的组合

通过 Matlab 编程,将同一时刻的侧、垂向加速度 a_y 、 a_z 与图 6 所示的 3 条曲折线进行组合,3 条折线由外向里分别代表持续时间为 0.05 s、0.1 s、 ≥ 0.2 s 时的 a_y 和 a_z 组合允许值,含义为若有超出某条折线且超出的持续时间大于等于该线代表的持续时间,则该段时间内加速度不符合要求。

若所有点都在曲折线内包围,则符合要求;若有超出某条曲折线的点,则需要判断:用连续超出某条线的点数乘以采样间隔,即为超出该条折线的持续时间,若求得的持续时间大于等于这条折线所代表的持续时间,则该段时间内加速度不满足要求。若某连续点超出 2 条或 3 条折线,则需要根据每条被超出的折线分别进行判断。

例如,连续的 2 个点位于 $\Delta t=0.1$ s 和 0.05 s 2 条折线之间,之后连续的 2 个点位于 $\Delta t=0.1$ s 和 $\Delta t \geq 0.2$ s 的 2 条折线之间,如图 7 所示,采样间隔为 0.05 s,则其超出 $\Delta t=0.1$ s 折线的持续时间为 $2 \times 0.05 = 0.1$ s,而超出 $\Delta t=0.1$ s 折线的 2 个点也同时超出 $\Delta t \geq 0.2$ s 的折线,故超出 $\Delta t \geq 0.2$ s 折线的持续时间为 $4 \times 0.05 = 0.2$ s,不符合要求。



注:3 条折线表示,当 a_z 、 a_y 同时存在时,在持续时间为 0.05 s、0.10 s、 ≥ 0.2 s 时,最大允许的加速度 a_z 、 a_y 值。

图 6 加速度 a_y 和 a_z 组合允许值

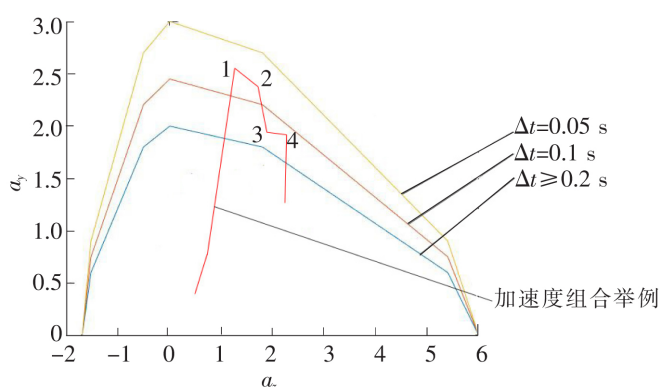


图 7 加速度组合举例图

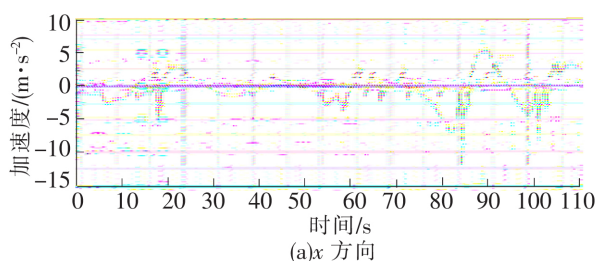
3 加速度评价方法的应用举例

以国内某单轨过山车为例,图 8 为该过山车的部分模型。

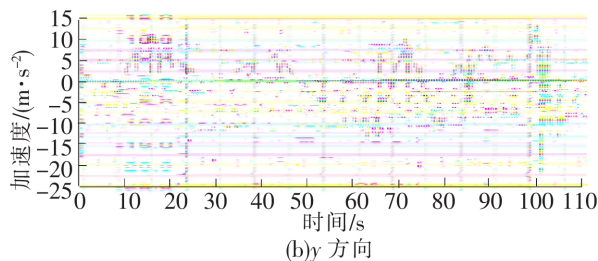
图 9 是过山车某座椅的人心位置在无风条件下的 x 、 y 、 z 向加速度仿真曲线图,仿真步长为 0.02 s^[7]。



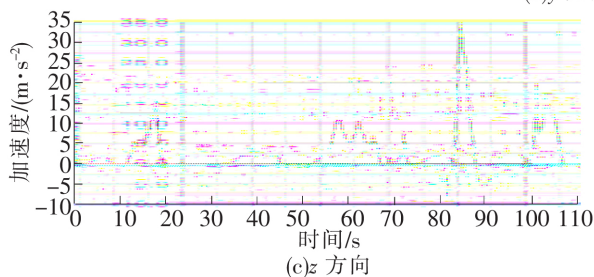
图 8 过山车部分模型



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

图 9 各方向加速度时间历程图

3.1 单方向加速度评价

根据图4的单方向加速度评价方法流程图,如图9(a)所示,其在 x 方向的加速度 $3.5g < a_x < 6g$,符合要求。

由图9(b)所示,其在 y 方向的加速度 $|a_y|_{\max} = 21.6 \text{ m/s}^2 > 2g$ 且 $< 3g$,将 y 方向的加速度数值输出后,得出在68.32~68.36 s有连续3个点超出 $2g$ 。

故超出允许值的持续时间为0.06 s,根据图4的评价方法可知, $0.05 \text{ s} < \Delta t = 0.06 \text{ s} < 0.2 \text{ s}$,代入 $\frac{10}{3}(1-2\Delta t)g$ 可得,当 $\Delta t = 0.06 \text{ s}$, $[a_y] = 28.776 \text{ m/s}^2$,而68.32~68.36 s的3点加速度值均没有超出 $[a_y]$,故符合要求。

由图9(c)所示,其在 z 方向的加速度 $-1.5g < a_z < 4g$,符合要求。

3.2 加速度组合评价

3.2.1 0.3 s时间差内侧垂向最大加速度组合

按照2.1节的评价方法,通过Matlab软件编写程序对侧向加速度 a_y 和垂向加速度 a_z 在0.3 s时间差内的最大加速度进行合成^[8],得到组合图10。

通过分析图10,并将数据输出,得到其超出允许值范围的时间分别是68.08~68.6 s(y 坐标为1.043和1.102)和68.86~68.88 s(y 坐标为0.629 1)。其中,68.08~68.6 s时间段内 a_y 的取值即为图9中超出 $2g$ 的加速度值,由于该段的侧向加速度允许值 $[a_y]$ 不是 $2g$,需要单独判断,由3.1节可知,该时间段内的 $[a_y] = 28.776 \text{ m/s}^2$,将其值代入到Matlab程序中,得到图11。

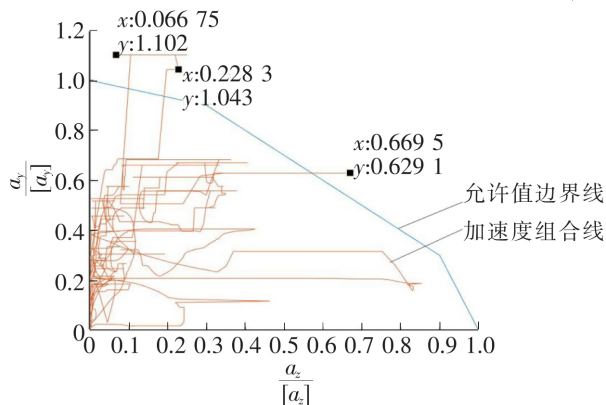


图10 0.3 s时间差内加速度组合评价图

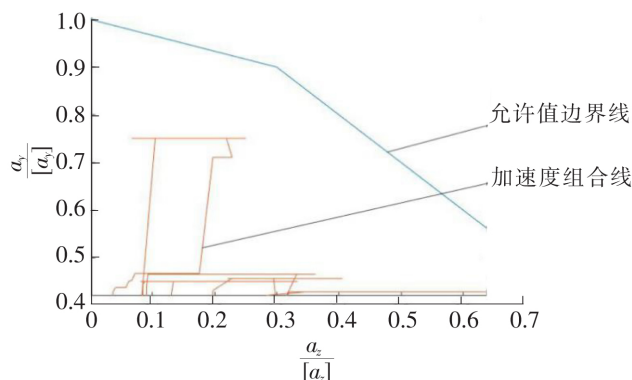


图11 改变 $[a_y]$ 值后加速度组合评价图

从图11可以得出,68.08~68.6 s时间段内的加速度符合要求。而68.86~68.88 s时间段内的侧向加速度小于 $2g$,而其加速度允许值为 $2g$,故由图10可知这段时间的加速度不符合《规范》要求。

3.2.2 同一时刻的侧垂向加速度组合评价

通过Matlab软件编程得到同一时刻的侧垂向加速度值与3条曲折线,如图12所示。

如图12所示,只有连续3个点超出 $\Delta t \geq 0.2 \text{ s}$ 的曲折线,超出的持续时间为 $3 \times 0.02 = 0.06 \text{ s} < 0.2 \text{ s}$,故符合《规范》要求。

综上所述,该过山车在68.86~68.88 s时间段内不满足0.3 s时间差内最大加速度值合成要求,需要找出该段时间对应的具体位置,优化轨道数据,使其满足《规范》要求。

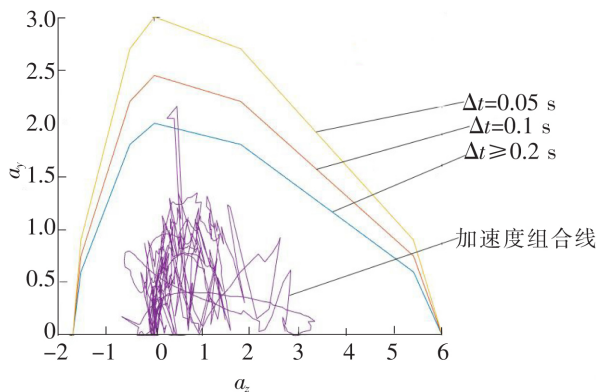


图12 同一时刻加速度组合评价图

4 结论

针对 GB 8408—2018《大型游乐设施安全规范》中关于游乐设施在运行过程中加速度的规定进行了系统研究,并提出了简单可行的评价方法,重点对单方向侧、垂向加速度、0.3 s 时间差内最大侧、垂向加速度组合以及同一时刻侧、垂向加速度组合的评价方法进行分析与详细描述,通过对国内某过山车实例进行加速度评价,证明了这种加速度评价方法的可操作性,对今后的大型游乐设施加速度评价有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1]梁朝虎,沈勇,鄂立军,等.游乐设施 G 加速度分析与判别方法[J].中国安全科学学报,2008,18(11):31-35.
- [2]国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.GB 8408—2018 大型游乐设施安全规范[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [3]陈卫卫,庞昂.无线加速度测试技术在过山车检测中的应用[J].中国特种设备安全,2017,33(2):1-6.
- [4]于泽涛.基于虚拟样机技术的过山车仿真研究[D].大连:大连理工大学,2009.
- [5]吴纯君.三环过山车车体二维设计与仿真研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2016.
- [6]张德兵,项辉宇,张勇,等.过山车加速度信号处理与安全评估[J].振动与冲击,2018,37(3):243-248.
- [7]王坤,邢海军,徐梦超,等.基于 ADAMS 的多刚体动力学简化建模与仿真[J].图学学报,2019,40(4):733-738.
- [8]刘浩,韩晶.MATLAB R2016a 完全自学一本通[M].北京:电子工业出版社,2016.

Research on Acceleration Evaluation Method of Large Amusement Facilities

Wang Kun, Xing Haijun, Zhang Linhao, Xu Mengchao

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Through a series of mathematical methods evaluating the acceleration of large-scale amusement facilities, this method can be simple and effective to determine whether the acceleration in all directions and the combination of acceleration meet the requirements of national standards. First of all, the national standard of large-scale amusement facilities acceleration requirement was described and analyzed, and then focusing on single direction side vertical acceleration, 0.3 s time the medial side of the vertical acceleration and the same time the vertical acceleration of combination evaluation method was put forward. Finally, this evaluation method was applied to the domestic on a roller coaster, verified the feasibility of this kind of evaluation method. This evaluation method can provide reference for the acceleration judgment of domestic large-scale amusement facilities.

Key words: large amusement facilities; acceleration; duration; acceleration combination; roller coaster