

高速试验环道几何设计技术研究

李运胜

(交通部公路科学研究所 北京 100088)

提要 高速试验环道设计车速高, 弯道半径小, 其几何设计是以人体对运动的敏感度作为设计指标的。本文结合交通部公路工程综合试验场的实体工程, 介绍了高速环道的几何设计技术。

关键词 试验场 高速环道 几何设计

Geometry Design of High-Speed Test Loop

Li Yunsheng

(Research Institute of Highway, Beijing)

Abstract High-speed test loop has the characteristics of high designing speed and small turning radius, then motion sensitivity is used as a guide to its geometry design. This paper presents the principle and method of the geometry design of high-speed test loop integrated with the Test Field of MOC for Highway and Traffic Engineering.

Key words Test field High-speed test loop Geometry design

0 概述

交通部公路工程综合试验场是交通部“八五”重点科研建设项目, 该试验场建成后将成为我国公路、交通工程和汽车试验的中心。高速试验环道(简称“高速环道”)是试验场的主要构成部分和关键项目, 是汽车进行连续高速行驶试验的基本道路设施, 可用于道路、交通工程、汽车、环境等多方面的试验研究。

高速环道设计车速高, 弯道半径小, 其几何设计实际上是要求在相当有限的场地内为汽车提供一条能连续高速行驶的跑道, 因此, 它的几何设计技术完全不同于一般的公路。

本文主要介绍交通部公路工程综合试验场高速环道的几何设计技术。

1 几何设计的理论基础

在高速环道的设计中, 由于受场地的限制, 采用小半径的弯道是不可避免的, 同时由于设计车速高, 其弯道的横向超高必然远远超出一般公路设计规范的要求, 因此, 弯道的设计(特别是从直道到小半径弯道之间的过渡段的设计)是整个高速环道几何设计中的关键。

当车辆在弯道上行驶时, 它的6个自由度都处在变化之中, 但实践表明: 当这些变化足

够小时，人体是无法感觉出来的；也就是说，只有当这些变化达到某一定的极限时，司机和乘客才会感觉得到。

1957 年，美国福特公司车辆实验部主任麦克康纳尔（W. A. McConnell）在此基础上提出了以人体对运动的敏感度为准则进行道路几何设计的理论和方法。

麦克康纳尔经过大量的试验和研究，首先找出了人体开始感觉到各运动自由度变化的感觉极限值（见表 1）。

麦氏认为：如果在道路设计时能够把 6 个自由度的运动特性值都控制在表 1 所列的极限值以内，则行车舒适性好，司机和乘客将感觉不到弯道的存在。以此作为理论基础，麦克康纳尔开发了一套完全不同于一般公路设计的道路几何设计方法。

在实体工程的设计中，考虑到场地和投资等各方面因素的影响，欧美及日本等国把麦氏提出的感觉开始极限值提高 2~3 倍作为试验场高速环道几何设计的控制指标，各国高速环道的行车实践表明这是切实可行的；另一方面，1978 年国际标准协会提出的“人体承受全身振动的评价指南〔ISO2621-1978（E）〕”也表明了这一点，即把麦氏的感觉极限值提高 2~3 倍作为道路的设计指标只对司机工作时间的长短有影响而不会影响正常行驶。

人对运动状态的感觉开始极限值 表 1					
运动自由度		运 动 特 性			
		位置 x	速度 dx/dt	加速度 d^2x/dt^2	加速度变化率 $\frac{d^3x}{dt^3}$
直线运动	纵向	无感觉	无感觉	$\pm 0.30\text{m/s}^2$	$\pm 0.15\text{m/s}^2$
	横向	无感觉	无感觉	$\pm 0.18\text{m/s}^2$	$\pm 0.09\text{m/s}^2$
	法向	无感觉	无感觉	$\pm 1.20\text{m/s}^2$	$\pm 0.24\text{m/s}^2$
旋转运动	偏向	无感觉	$\pm 5\text{deg/s}$	$\pm 2\text{deg/s}^2$	$\pm 1\text{deg/s}^2$
	侧摆	$\pm 1.1\text{deg}$	$\pm 8\text{deg/s}$	$\pm 4\text{deg/s}^2$	$\pm 2\text{deg/s}^2$
	纵摆	$\pm 1.9\text{deg}$	$\pm 12\text{deg/s}$	$\pm 6\text{deg/s}^2$	$\pm 3\text{deg/s}^2$

2 主要技术指标的确定

2.1 平面形状选择

高速环道的建设在世界上已有 80 多年的历史，各国试验场高速环道的平面形状多种多样，主要有圆形、椭圆形、三角形、电话听筒形等。这些形状各有其优缺点，各试验场主要根据各自的场地条件和试验功能来选定。

交通部公路工程综合试验场高速环道除了进行汽车的高速耐久性试验外，还将为高等级公路的标志、标线、信号、照明、车道宽度、交通容量等公路交通科研试验提供道路设施。因此，选定有利于进行这些综合性试验的椭圆形（既有曲线路段又有直线路段）作为该试验场高速环道的平面形状。

2.2 设计车速

根据我国现行高速公路标准设计车速（平原微丘地区）为 120km/h 的现状，综合考虑我国及世界汽车工业的现状与发展趋势，确定试验场高速环道的设计车速如下：高速车道的设计车速为 190km/h，低速车道的设计车速为 70km/h。

2.3 圆曲线半径

圆曲线半径的选择主要受到占地面积、施工条件和安全使用条件的限制。半径越大，横向超高越小，使用性能越好，但占地越多，投资越大；半径越小，横向超高越大，使用性能越差，而且施工难度越大。

综合考虑技术、经济等各方面的因素，交通部公路工程综合试验场的圆曲线半径确

定为 400m。

根据麦克康纳尔曲线的设计原理：当车辆在圆曲线上行驶时，其离心力完全由横向超高所平衡，车辆的受力状态如图 1 所示；此时，司机和乘客所能感觉到的运动自由度只有两个，即法向加速度 a 和偏向角速度 ω ，其值可计算如下：

$$\because R=400\text{m}, v=190\text{km/h}=52.7778\text{m/s}$$

$$\text{且 } \tan\theta = v^2 / (g \times R) = 0.7104$$

$$\therefore a = g \times [(1 + \tan^2\theta)^{1/2} - 1] = 2.221(\text{m/s}^2)$$

$$\omega = 180 \times v / (\pi \times R) = 7.56(\text{deg/s})$$

对照表 1 可知，其法向加速度和偏向角速度值分别为人体感觉开始极限值的 1.85 倍和 1.51 倍，均在控制范围（2~3 倍）之内。

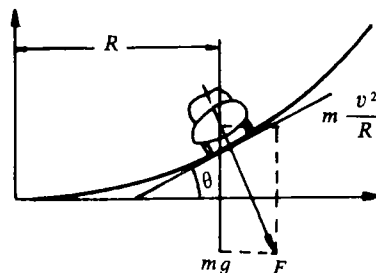


图 1

2.4 直线段长度、宽度及横坡

综合考虑道路几何特性、通行能力、标志标线及车辆性能等各项试验的基本要求和场地的尺寸，确定交通部公路工程综合试验场高速环道两条直线段的长度均为 1080m；直线段路面则设计为三车道，其宽度为 3 × 4m。

考虑到路面排水的要求，直线段横坡设计为 1.5% 的单向内倾横坡。

3 平面线型设计

在平面形状确定以后，高速环道的平面线型设计实际上就是其缓和曲线的平面线型设计，这是因为其直线段和圆曲线段平面线型的设计与一般公路的设计方法相同。下面主要介绍缓和曲线部分的平面线型设计。

3.1 缓和曲线形式和长度的确定

与一般道路相同，在高速环道的直线段和圆曲线段之间也必须设置缓和曲线，而且其设计成功与否直接关系到高速环道的使用性能与行车安全。

在一般公路设计上，缓和曲线多采用模拟车辆行驶轨迹的克罗索依德（Klothoid）曲线，其相关特性为曲率半径与曲线长度成反比。在这种曲线的起终点处曲率是不连续的，而且设计时也没有考虑车辆高速转弯时乘车人感觉上的感受能力和行车的安全性、舒适性。

为了优化线形设计，提高行车的舒适性和安全性，交通部公路工程综合试验场选定麦克康纳尔曲线作为高速环道的缓和曲线形式。

根据麦克康纳尔的研究设计成果，车辆在弯道上行驶时，6 个自由度都在发生变化，其中以人体对侧摆运动的变化最为敏感，如果设计时能将侧摆运动的特性值控制在人体的感觉极限内，则其它各运动自由度往往不会影响行车的舒适性。因此，麦氏选定侧摆运动的加速度变化率作为缓和曲线设计的控制参数。

缓和曲线长度 S 和侧摆加速度变化率 J 的关系如下：

$$S = (32\psi/J)^{1/3} \times v$$

式中： S ——缓和曲线长度（m）；

ψ ——侧摆角（deg）；

J ——侧摆加速度变化率（deg/s³）；

v ——设计车速（m/s）。

经过反复试算和比较，确定缓和曲线长度为 408 米，此时：

$$\theta=\arctg(v^2/(g\times R))=35.39\text{ (deg)}$$
$$\psi=\theta-\theta_0=35.39-\arctg(0.015)=34.53\text{ (deg)}$$
$$\therefore J=32\psi\times(v/S)^3=2.39\text{ (deg/s}^3\text{)}$$

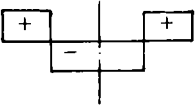
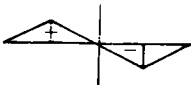
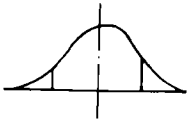
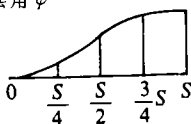
结合表 1 可知：此侧摆加速度变化率 J 仅为麦氏的感觉开始极限值 (2deg/s^3) 的 1.2 倍。这一指标不仅优于国内试验场的高速环道 (海南汽车试验场高速环道的 J 值为 4deg/s^3 ，定远汽车试验场 J 值为 3.38deg/s^3)，而且也高于国外大多数试验场的高速环道 (如日本新三菱冈崎试验场高速环道 J 值为 4.5deg/s^3)。

3.2 缓和曲线平面线型设计

在设计高速环道时，一般以高速车道的中心线作为设计线。根据麦克康纳尔曲线的设计原理，缓和曲线平面线型的设计方法如下：

①按表 2 中所列的各公式计算出设计线上各设计站点的侧摆运动特性值，并对 $a_{\max}$ ， $\omega_{\max}$ 及 $\psi_{\max}$ 进行验算。

表 2

x	$0\sim\frac{S}{4}$	$\frac{S}{4}\sim\frac{3}{4}S$	$\frac{3}{4}S\sim S$
侧摆角加加速度 J 	Cv^3	$-Cv^3$	Cv^3
侧摆角加速度 a 	Cv^2x	$Cv^2(\frac{S}{2}-x)$	$Cv^2(x-S)$ $ a_{\max} = a_{x=\frac{3}{4}S} =\frac{Cv^2S}{4}$
侧摆角速度 ω 	$\frac{1}{2}Cvx^2$	$\frac{1}{2}Cv(-x^2+Sx-\frac{1}{8}S^2)$ $\omega_{\max}=\omega _{x=\frac{S}{2}}=\frac{CvS^2}{16}$	$\frac{1}{2}Cv(x^2-2Sx+S^2)$
侧摆角 φ 	$\frac{1}{6}Cx^3$	$C(-\frac{x^3}{6}+\frac{Sx^2}{4}-\frac{S^2x}{16}+\frac{S^3}{192})$	$C(\frac{x^3}{6}-\frac{Sx^2}{2}+\frac{S^2x}{2}-\frac{13S^3}{96})$ $\varphi_{\max}=\varphi_{x=S}=\frac{CS^3}{32}$

* 表 2 中： $C=(32\varphi/J)^{1/3}\cdot v$ ； x 为缓和曲线上某点距其起点的距离。

②根据设计线上各站点侧摆运动特性值中的侧摆角 (ψ_i)，计算其横向超高倾角 (θ_i) 及平曲线半径 (R_i)：

$$\theta_i=\psi_i+\theta_0$$
$$R_i=v^2/(g\times\tan\theta_i)$$

③按表 3 所列的各公式计算设计线上各站点的平面坐标值 (a, b)。

表 3

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬ 坐标		⑭ 切线角
缓和曲线 站点编号	距缓和曲线 起点距离	侧摆 角 φ	横向超高 倾角 θ	斜率 $\tan\theta$	$\sin\frac{\beta}{2}$	β	偏斜 角 α	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$	Δa	Δb	a	b	$\sum\beta$
1	ΔS	φ_1	θ_1	$\tan\theta_1$		β_1	α_1	$\sin\alpha_1$	$\cos\alpha_1$	Δa_1	Δb_1	a_1	b_1	
2	$2 \cdot \Delta S$	φ_2	θ_2	$\tan\theta_2$		β_2	α_2	$\sin\alpha_2$	$\cos\alpha_2$	Δa_2	Δb_2	a_2	b_2	
3	$3 \cdot \Delta S$	φ_3	θ_3	$\tan\theta_3$		β_3	α_3	$\sin\alpha_3$	$\cos\alpha_3$	Δa_3	Δb_3	a_3	b_3	
i	$i \cdot \Delta S$	φ_i	θ_i	$\tan\theta_i$		β_i	α_i	$\sin\alpha_i$	$\cos\alpha_i$	Δa_i	Δb_i	a_i	b_i	
n	$n \cdot \Delta S$	φ_n	θ_n	$\tan\theta_n$		β_n	α_n	$\sin\alpha_n$	$\cos\alpha_n$	Δa_n	Δb_n	a_n	b_n	

表中: ④ $\theta_i = \varphi + \theta_0$ ⑥ $\sin\frac{\beta_i}{2} = \frac{\Delta S/2}{R_i}$ ⑧ $\alpha_i = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{i-1} + \beta_{i/2}$

$$\textcircled{11} \Delta a_i = \Delta S \cdot \cos\alpha_i \quad \textcircled{12} \Delta b_i = \Delta S \cdot \sin\alpha_i \quad \textcircled{13} a_i = \sum_{j=1}^i \Delta a_j \quad b_i = \sum_{j=1}^i \Delta b_j$$

4 纵断面基准线设计

在高速环道的直线部分 (1080×2m), 纵坡设计为 0%。

在高速环道的曲线部分, 由于横向超高的存在, 各条纵断面线都不相同, 因此在进行曲线部分的纵断面设计时, 都必须确定一条纵断面设计基准线。这条基准纵断面线一般有 3 种设计方法:

①以路面内边缘线作为设计基准线, 各行车道路面沿横向全部上升;

②以路面外边缘线作为设计基准线, 各行车道路面沿横向全部下降;

③以路面中间的某条纵断面线为基准, 内侧行车道沿横向下陷, 外侧行车道沿横向上升。

以上 3 种设计方法, 各有利弊。根据交通部公路交通工程综合试验场地势平坦, 地下水位埋深浅的特点, 设计选用第①种方法, 即以路面内边缘线作为曲线部分纵断面设计的基准线, 纵坡设计为 0%, 其余各车道沿横向上升。

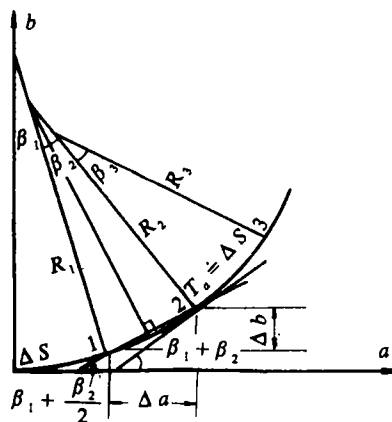


图 2

5 横断面设计

高速环道直线部分的横断面设计与一般公路的设计基本相同, 本文不再赘述。以下主要介绍弯道部分横断面的设计技术。

5.1 圆曲线段的横断面设计

高速环道设计车速高, 平曲线半径小, 因此要使车辆安全高速通过小半径曲线, 就必然要设置大的超高横坡。麦克康纳尔曲线的设计原理即是假设车辆在弯道上行驶时完全利用横向超高来平衡所产生的离心力, 并以此作为理论基础进行横断面设计。

如图 1 所示, 当车辆在弯道上行驶时其离心力与重力的合力垂直于路面。即:

$$\tan\theta = v^2 / (g \times R)$$

$$F = mg \times \cos\theta + (m \times v^2 / R) \times \sin\theta$$

因为没有横向力作用于车体上，所以这时车辆的行驶速度称为平衡车速。

在进行弯道部分的横断面设计时，横断面可采用各种形式的曲线。

根据交通部公路工程综合试验场高速环道试验车速的分布特点，综合考虑行车安全、施工难易及工程造价等因素，选择复合曲线（1-C-1）作为横断面的曲线形式，使断面上平衡车速的分布与横向距离成正比。

圆曲线段横断面的具体设计步骤如下：

5.1.1 确定圆曲线段横断面上各车道的加宽及宽度

本试验场高速环道圆曲线部分内侧设置 2m 的硬路肩（即路面内侧加宽 2m），外侧设置 1m 的安全带，其路面结构均同主行车道；高、低速车道不设加宽，中速车道水平加宽 2m。因此，圆曲线部分路面的总宽度为 17m（水平投影宽度），即：2-4-6-4-1（如图 3 所示）。

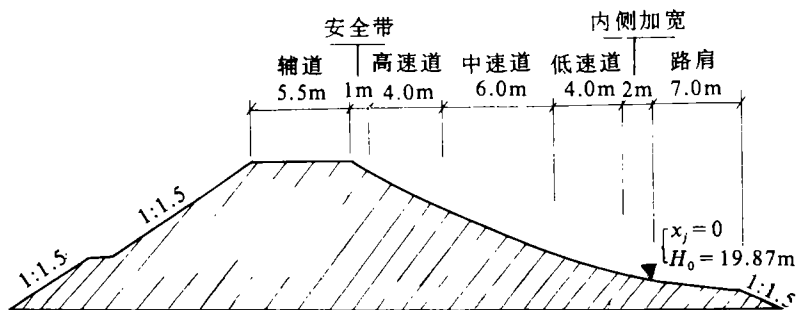


图 3

5.1.2 求车速横向分布方程 ($v=A \times x+B$)

如图 3 所示，有： $70=4 \times A+B$

$$190=14 \times A+B$$

解以上二元一次方程组，得： $A=12$ ； $B=22$

即圆曲线部分的车速横向分布方程为：

$$v=12 \times x+22 \text{ (km/h)}$$

$$\text{或：} \quad v=(12 \times x+22) / 3.6 \text{ (m/s)}$$

5.1.3 计算横断面上各点的斜率值 ($\tan \theta_j$)

首先根据圆曲线的设计半径 R 及横断面上各点的横向距离 x_j ，计算出横断面上各点的水平曲率半径 R_j 及设计平衡车速 v_j ：

$$R_j=R_{14}+x_j=R-14+x_j=386+x_j$$

$$v_j=(12 \times x_j+22) / 3.6$$

然后，按以下各式可计算出横断面上各点的斜率值：

$$\tan \theta_j=\tan \theta_j|_{x=2}=0.0429 \quad (x \leq 2 \text{ m})$$

$$\tan \theta_j=v_j^2 / (g \times R_j) \quad (x=2 \sim 16 \text{ m})$$

$$\tan \theta_j=\tan \theta_j|_{x=16}=0.8968 \quad (x=16 \sim 17 \text{ m})$$

5.1.4 计算横断面上各点的设计高程 (H_j)

假设横断面设计时横向计算步长为 D ，则有：

$$H_j=H_0+\sum_{i=1}^j (D \times \tan \theta_i)$$

式中, H_0 为路面内缘线的设计高程, 本设计中 $H_0=19.87\text{m}$

5.1.5 验算横断面上各点的曲率半径或双轮差

根据汽车试验的安全性要求, 横断面上各点的曲率半径应 $\geq 17\text{m}$ 或双轮差 $\leq 15\text{mm}$, 所以应验算横断面上各点的曲率半径或双轮差。

①曲率半径 (ρ) 的计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{由 5.1.3 可知: } \tan\theta &= v^2/(g \times R) \\ &= ((12 \times x + 22)/3.6)^2/(g \times (386 + x)) \\ &= F'(x) \end{aligned}$$

对 $F'(x)$ 求导数, 即可得 $F''(x)$

$$\therefore \rho = 1/k = (1 + F'^2(x))^{3/2}/F''(x) = f(x)$$

经验算, 在本试验场高速环道中: $\rho_{\min} = 18.715\text{m} > 17\text{m}$, 满足工艺设计要求。

②鉴于双轮差的计算比较繁杂, 本文只简单介绍其数学模型及计算原理:

第 1 步: 建立双轮差计算的数学模型。如图 4 所示, 图中 $AB=m$ 为车辆外轮接地中心的间距, $BC=n$ 为双轮的轮距, ADB 为高速环道横断面曲线 (即 $y=F(x)$), CD 的长度即为待求的双轮差值;

第 2 步: 求解 B 点的坐标值 $(x_B, F(x_B))$ 。设 A 点坐标为 $(x_A, F(x_A))$, 根据条件 $[F(x_B) - F(x_A)]^2 + (x_B - x_A)^2 = m^2$, 采用迭代逼近法, 即可求出 $(x_B, F(x_B))$;

第 3 步: 求出 C 点的坐标及直线 CD 的直线方程;

第 4 步: 解 CD 直线与 $y=F(x)$ 曲线的联立方程组,

求出 D 点坐标;

第 5 步: 当 A 点以某一步长在曲线上移动, 可逐次计算出各位置上的双轮差值。

本试验场的验算结果为: 双轮差 $\leq 15\text{mm}$ 。

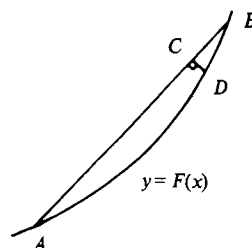


图 4

5.2 缓和曲线段的横断面设计

在高速环道的缓和曲线上, 任意两个设计站点的横断面都是不同的, 但其设计原理与圆曲线部分是相同的, 即: 以路面的横向超高来平衡车辆高速行驶时产生的离心力。其具体的设计方法和步骤如下:

5.2.1 计算设计站点上各车道的加宽值和宽度:

从直线段过渡到圆曲线段, 路面的水平总宽度及各车道的宽度都在不断的变化, 其变化值可按设计线上侧摆角 (ϕ_i) 的变化率进行计算, 即:

$$W_j = W \times \phi_i / \phi_{\max}$$

根据每一站点上各部分的加宽值, 即可确定该站点的宽度分布图。

5.2.2 采用与圆曲线段横断面设计相同的方法, 求出主行车道上横向平衡车速分布方程:

$$v = A \times x + B$$

5.2.3 求内侧一次曲线与复曲线 (C) 的交点位置:

a. 根据平面线型设计中各站点设计线上的横向超高倾角 (θ_i) 和平曲线半径 (R_i), 以及各部分的加宽值可以算出 $R_{\text{内}}$, 按 $\tan\theta = v^2/(g \times R) = (A \times x + B)^2/(g \times (R_{\text{内}} + x))$, 求出 $\tan\theta = 0.015$ 时的 x 值 (即水平宽度 x_1);

b. 令各站点内侧路面加宽值 $2 \times \phi_i / \phi_{\max} = x_2$, 比较 x_1 和 x_2 的大小: 若 $x_1 > x_2$, 则一次曲

线与复曲线的交点位置在水平宽度 x_1 处, 且一次曲线的斜率取 0.015; 若 $x_1 < x_2$, 则一次曲线与复曲线的交点位置在水平宽度 x_2 处, 且一次曲线的斜率为复曲线在该处的切线斜率。

5.2.4 求外侧一次曲线的起点位置

当按车速分布方程 $v=A \times x+B$ 计算出的横向最大超高倾角 (最外缘处) 小于控制倾角 ($41^{\circ}53'09''$) 时, 复曲线与一次曲线的交点位置为最外缘处, 即外侧一次曲线的长度为 0;

当按车速分布方程 $v=A \times x+B$ 计算出的最大横向超高倾角 (最外缘处) 大于控制倾角 ($41^{\circ}53'09''$) 时, 一次曲线的起点位置即为复曲线上该控制倾角的切点位置。

5.2.5 按照与圆曲线横断面设计相同的方法, 可依次计算出横向各点的斜率及高程, 逐一完成各站点的横断面设计。

6 结语

交通部公路工程综合试验场高速环道已于 1994 年 10 月合龙, 实车试验的顺利进行 (车速为 190km/h) 证明高速环道的几何设计是成功的。

高速环道的几何设计方法实际上是解决了车辆高速通过小半径曲线的线形优化问题。在日本及部分欧美国家的公路设计规范中, 已经将人体对运动的感受 (如舒适度) 作为道路几何设计的评价指标。

随着我国公路事业的发展, 车辆行驶速度会越来越高, 人们对车辆行驶安全性和舒适性的要求也必将越来越高, 这就要求道路设计者们不断地去探索新的设计理论和方法。交通部公路工程综合试验场高速环道的成功设计, 为道路线形的优化设计提供了一条新的思路。

参考文献

1. William A. McConnell. Motion Sensitivity as a guide to Road Design, Ford Motor Co., SAE Transaction. Vol. 65, 1957.
2. 江玉高等. 交通部公路工程综合试验场的设计功能. 道路工程学术会议论文集, 1993.
3. 崔健球等. 海南汽车试验场工程设计技术.
4. 铃木修, 柏木敏男. 汽车试验场的设计. 田玉申译自“自动车技术” 1963, VOL17, No. 8.