中国科学: 技术科学 2012 年 第 42 卷 第 2 期: 174 ~ 181
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

人体自行车机构分析及优化设计: 量身定做自行车

刘辛军*, 王京, 于维旸, 吴金华

清华大学精密仪器与机械学系制造工程研究所, 摩擦学重点实验室, 北京 100084
* E-mail: xinjunliu@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011-04-22; 接受日期: 2011-07-27
清华大学大学生研究训练计划(批准号: 102T0078)和国家自然科学基金(批准号: 51075222)项目资助

摘要 人体自行车机构的优化设计对于提高运动员的成绩以及保护骑车者的身体健康有着重要作用. 从自行车诞生之初, 人们就从人体生理学角度不断优化自行车的设计. 目前自行车的基本结构已经固定, 但是很多几何参数的优化设计还没有成型. 本文从机构学的角度出发, 结合人体的生理特征, 将人体和自行车机构化, 以省力为主要目标, 兼顾舒适度, 探讨了车座坐高、曲柄长度和人体参数(大腿和小腿的长度)之间的关系, 绘制出相应的性能指标图谱, 从而得到这些指标与坐高等参数的映射关系, 并依此建立了人体自行车机构优化设计方法, 得到了对应于不同身材的运动员理想的自行车坐高与曲柄长度的可选方案. 本文的研究对量身定做自行车以及设计自行车机器人具有指导意义.

关键词
自行车优化设计
人体自行车机构
性能指标
性能图谱

1 引言

自行车问世以来, 它在人们的生活中起着举足轻重的作用, 因此人们对于自行车也在不断地做出改进. 人们发现, 与骑行者身材相适应的自行车可以相对节省力气并提高速度, 而与身材不相称的自行车则恰恰相反. 因此, 对于自行车爱好者们, 拥有一辆"量身定做"的自行车可以很大幅度地提高骑行的数据与成绩. 由于人在骑行过程中主要是由大腿作为驱动腿, 提供驱动力, 而小腿用来传力, 以摆动形式输入, 最终使脚蹬曲柄转动, 带动后轮使整车运动. 作为提供动力的大腿, 它的舒适度以及疲劳程度对骑行者有很大的影响, 所以, 对于自行车的优化设计一直以来主要针对的是对人体生理结构的适应.

目前, 许多学者、研究机构与公司已经着手于自行车个性化设计的研究, 并取得了一些成果. 有些学者利用经验公式并结合编程和绘图进行自行车设计, 例如, 邓益民和张仲源[1]等人利用人体尺寸数据库、自行车国家标准数据库及自行车经验数据库为基础, 结合人机学原理进行设计. 北京工业大学的张聪敏[2]利用自组织数据挖掘算法对收集的 210 名运动员的身体尺寸信息及其自行车的尺寸信息进行分析, 总结出两者之间的关系公式, 并以此作为设计自行车车架的设计准则. 澳大利亚的 Mclean 和 Parker[3]在研究本国的场地自行车运动员时采用统计学的方法, 得出鞍座高度应该为 100%的跨高高度左右的结论. 还有很多学者利用经验公式, 着重于提高骑车舒适度来设计自行车, 例如, 荷兰 *Delft* 理工大学的 Henri 等人[4]利用一个试验研究和一个实验室研究来测试车架参数对于骑车人舒适度的影响, 他们通过总结人体尺寸参数和测试参与试验人员的舒适度之间的数据关系, 开发出一款适用于商业的自行车选购系

英文版发表信息: Liu X J, Wang J, Yu W Y, et al. Analysis and optimum design of rider-bicycle mechanisms: Design of bicycle parameters for a specified rider. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 3027–3034, doi: 10.1007/s11431-011-4575-x

统. 又如, 英国萨里大学工程学院的 Sharp[5]教授通过理论计算与仿真的方法对标准自行车的各个参数(包括车轮大小等)进行优化, 旨在提高自行车的稳定性, 即骑行者对自行车的控制. 一些自行车公司也依据经验公式设计相应软件, 采集用户身体以及骑车习惯等各个参数后进行设计, 例如, Seven 公司定制自行车所需客户填写的表格, 其更加注重人的感觉和舒适度, 而对于车架具体参数如车轮大小等等往往都需要客户自己来选择. 基于大量信息和数据, 再加上客户的特殊要求, Seven 公司凭此为个人"量身设计"舒适的自行车[6]. 另外, 通过对于人体疲劳程度的研究, 人们也给出了不同的优化设计, 如天津大学的吴小凡[7]提出以肌肉应力平方和的标准度量肌肉疲劳, 以疲劳程度最小为目标, 采用回归分析的方法, 结合建立人—车运动学仿真来建立车架结构设计变量与优化指标之间的函数关系, 并根据对车架的有限元分析进行结构改进, 最终设计出利于减小疲劳的自行车. 而北京体育大学的孙科[8]采用表面几点测试结合运动学录像解析的方法, 研究不同的座高对于运动员下肢肌肉工作状态以及动作技术的影响. 以肌电放电量最小为标准(即节省能量), 得出以人体腿长的 95%为座高的情况下, 各个肌肉放电量大体处于中等水平比较适合大多数运动员的结论.

综上可以看出, 目前国内外对于自行车的研究主要关注根据人的生理条件进行自行车的设计. 事实上, 在自行车骑行过程中, 人的大、小腿以及自行车运动和执行机构构成一个机械运动系统, 需要满足机械运动的原理. 因此, 根据机构运动学理论, 兼顾人的生理因素来设计自行车是一个值得深入研究的发展方向. 本文将人的大腿、小腿以及自行车的车座高和脚蹬曲柄等主体机构构成部分机构化, 忽略次要因素, 如脚踝的调节作用等, 得到一个双曲柄摇杆机构模型, 结合中国成年人人体尺寸的国家标准以及人体大腿肌肉疲劳的相关参数, 从而计算人体作用力和大腿疲劳的相关系数, 针对不同大腿小腿长度比的人设计出较为理想的自行车, 为运动员选拔、自行车设计制造和自行车机器人设计提供理论基础.

2　人体自行车机构及其分析

图 1 为人体自行车的骑行示意图. 将人体结构和自行车机构化后的模型, 如图 2 所示. 将人的臀部与车座固结, 并通过髋关节与大腿连接, 大腿通过膝关节与小腿连接, 小腿再通过踝关节与脚连接, 且将脚固结在曲柄上, 同时将以上连接都视为转动副连接, 大腿、小腿和曲柄都视为杆件. 这样就构成了一个以大腿为驱动、座高为机架的曲柄摇杆机构, 大腿为 L_1, 小腿为 L_2, 脚蹬曲柄为 L_3, 座高为 L_4. 这样, 人的大、小腿与自行车运动杆件构成了一个双曲柄摇杆机构.

对于图 2 所示的由 L_1,L_2,L_3 和 L_4 构成的四杆机构. 由于人体的生理条件, 对曲柄摇杆机构杆长度之间

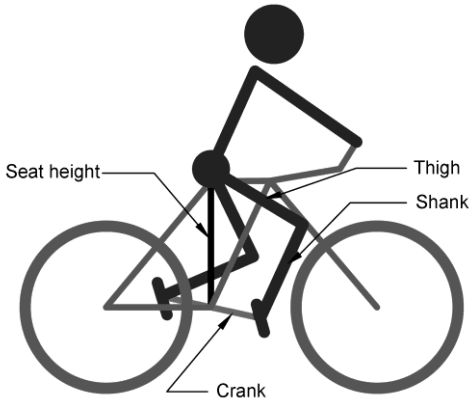

图 1　人体自行车骑行示意图

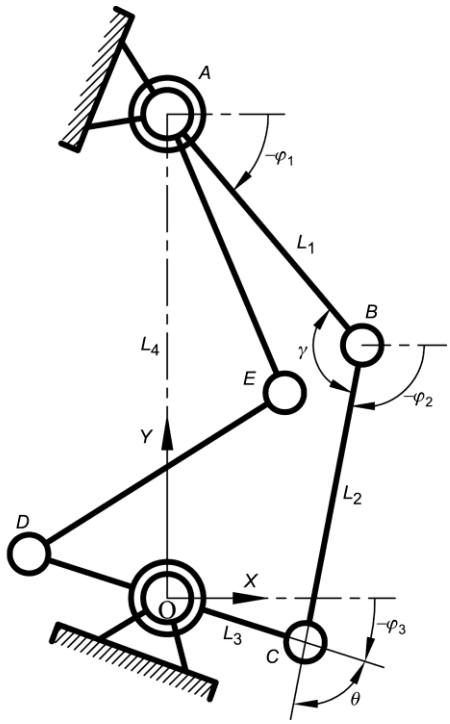

图 2　人体自行车骑行机构: 双曲柄摇杆机构

关系的限制有

$$L_4 > L_1 > L_2 > L_3. \tag{1}$$

同时, 由于格拉霍夫准则, 杆件L_3为整周转动的条件为

$$L_1 + L_2 > L_3 + L_4. \tag{2}$$

为了说明方便, 将髋关节的零度角定义为人体直立时的大腿相对于上肢的角度, 膝关节的零度角定义为小腿相对于大腿的角度, 顺时针为负, 逆时针为正. 对于机构模型来说, L_1与L_4的夹角为髋关节角度, L_1与L_2的夹角为膝关节角度. 由于人的生理条件[9]限制, 各关节的活动范围如表 1 所示.

如图 2 所示, 以曲柄中心为原点建立 XOY 平面坐标系, O 为曲柄 L_3 转轴, Y 方向为原点 O 与大腿髋关节 A 的连线方向. 各角度定义如图 2, φ_1 为 L_1 与 X 轴方向夹角, φ_2 为 L_2 与 X 轴方向夹角, φ_3 为 L_3 与 X 轴方向夹角, γ为膝关节角度, θ为 L_2 与 L_3 之间的夹角, 如果曲柄摇杆机构的传动角定义为μ, 则当θ不大于 90°时$\mu=\theta$, 当θ大于 90°时$\mu=$ 180°$-\theta$. 特别需要说明的是, 因为对于机构处于不同的姿态下, 它的各个传动角的角度表达形式是不一样的, 它们又与机构的传力性能和人下肢舒适度息息相关, 因此需要把不同姿态下的机构传动角和膝关节角度表示出来. 为了方便计算, 在这里规定φ_1, φ_2和φ_3三个角度以水平轴为起始边, 终边顺时针旋转为正, 逆时针旋转为负, 三个角度的取值范围是–180°~+180°之间. 同时, 由于左右对称, 这里只考虑一边的情况, 也就是只考虑一条腿在整个一个周期循环过程中 L_2 对 L_3 的传动角μ和舒适度角γ的计算. 其中, 传动角和舒适度角的正弦计算表达式为

$$\sin\mu = |\sin(\varphi_2 - \varphi_3)|, \tag{3}$$

$$\sin\gamma = |\sin(\varphi_2 - \varphi_1)|. \tag{4}$$

由于机构为单自由度机构, 因此对应每一个确定的输出φ_3都有一个确定的输入值φ_1.

在 XOY 坐标系下, C 点的坐标可以用向量 $\boldsymbol{c}$ 来表示:

$$\boldsymbol{c} = (x \quad y)^{\mathrm{T}}, \tag{5}$$

其中 $x = L_3\cos\varphi_3$ 和 $y = L_3\sin\varphi_3$, B 点的坐标可以用向量 $\boldsymbol{b}$ 来表示:

$$\boldsymbol{b} = \left(L_1\cos\varphi_1 \quad L_4 + L_1\sin\varphi_1\right)^{\mathrm{T}}. \tag{6}$$

则曲柄摇杆机构的运动学方程可以通过如下约束方程给出:

$$|\boldsymbol{bc}| = L_2, \tag{7}$$

即

$$\left(L_1\cos\varphi_1 - x\right)^2 + \left(L_4 + L_1\sin\varphi_1 - y\right)^2 = L_2^2\sqrt{b^2 - 4ac}. \tag{8}$$

则有

$$\varphi_1 = 2\tan^{-1} q, \tag{9}$$

式中, $q = \dfrac{-A + N\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{C - B}$, $A = 2L_1(L_4 - y)$, $B = -2xL_1$, $C = L_1^2 + x^2 + (L_4 - y)^2 - L_2^2$, $N = \pm 1$.

那么, 如果已知 C 点的坐标值, 也就是已知输出角度φ_3, 则可以通过(9)式求出大腿输入角度φ_1, 此即曲柄摇杆机构的运动学反解问题. 由(9)式可知, 机构的运动学反解有两组解, 由于正常人的生理条件限制, B 点只能向前弓, 因此当 N=1 时是人体自行车的曲柄摇杆机构的正确反解.

这样, 基于运动学反解, 对于给定的机构姿态, 就可以得到对于的传动角和舒适度角. 令 $L_{23} = \sqrt{\left(L_1\cos\varphi_1\right)^2 + \left(L_4 + L_1\sin\varphi_1\right)^2}$, 则

$$\mu = \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - L_{23}^2}{2L_2L_3}\right). \tag{10}$$

令 $L_{12} = \sqrt{x^2 + \left(L_4 - y\right)^2}$, 则

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_1^2 - L_{12}^2}{2L_2L_1}\right). \tag{11}$$

在腿与脚蹬曲柄的运动过程中, 会遇到小腿 L_2 与曲柄L_3共线的情况. 在这种情况下, 机构会因为压力角为 90°而卡死, 称为奇异状态. 虽然单曲柄机构存在着两种奇异位形, 一种为曲柄 L_3 与小腿 L_2 重合共线, 另一种为曲柄 L_3 在小腿 L_2 延长线上而共线, 但是, 人体自行车是双曲柄摇杆机构, 且曲柄之间为刚性连接, 在实际骑行过程中当一边的小腿与曲柄处于奇异状态的时候, 即改换另一边作为驱动源, 而

表 1　人体髋、膝关节的活动范围

Joints	ROM	Maximum Angle (°)	Maximum range	Comfortable adjustment range (°)
Hip	forward, backward bending	+120~–15	135	+85~+100
Knee	forward, backward swing	0~–135	135	–95~–120

此时另一边的小腿并不处于奇异状态. 那么, 由于两条腿与曲柄耦合出现奇异状态的位置是错开的, 单侧的机构可以比较容易地渡过奇异位置, 而不会出现卡死的状态.

3　性能指标及其图谱

3.1　设计空间

在上述分析的条件下, 采用文献[10]中的无量纲方法, 可以得到一个包含所有满足条件的机构杆长参数组合的空间, 称作设计空间. 首先, 将参数无量纲化, 定义因子 $D=(L_1+L_2+L_3+L_4)/4$, 得到 4 个无量纲尺寸参数:

$$l_1=\frac{L_1}{D}, l_2=\frac{L_2}{D}, l_3=\frac{L_3}{D}, l_4=\frac{L_4}{D}.$$

同时, 它们满足关系:

$$l_1+l_2+l_3+l_4=4 \tag{12}$$

$$l_1:l_2:l_3:l_4=L_1:L_2:L_3:L_4. \tag{13}$$

由方程(1),(2)和(12), 得

$$0<l_3<1<l_4<2\leqslant l_1+l_2<\frac{8}{3}. \tag{14}$$

以 l_1, l_2, l_4 作为三个相互垂直的坐标轴, 定义一个三维空间, 并在空间中得到满足上述条件关系式的区域, 如图 3 和 4 所示.

如图 3 所示的空间为所有满足条件的可构成人体自行车机构的无量纲化参数的范围. 如果根据人自身条件来优化座高和曲柄, 则在优化过程中, 人的大、小腿的比例是确定的, 即 L_1:L_2 或者 l_1:l_2 为常数, 设为 a, 那么, l_1:l_2=a 平面与图 3 中四面体取交集即可得到一个平面区域, 如图 4 中的三角形. 此区域即为大腿与小腿长度之比为 a 的人所可以骑行的自行车座高和脚蹬曲柄的参数范围, 图 4 中的 s 和 t 与无量纲化参数之间的关系如下:

$$s=\frac{a}{\sqrt{1+a^2}}l_1+\frac{1}{\sqrt{1+a^2}}l_2 \tag{15}$$

$$t=l_4. \tag{16}$$

3.2　性能指标

由于上文中定义的传动角μ和舒适度角γ与人体在骑行过程中的疲劳程度与舒适度息息相关, 因此下面用(3)和(4)式来定义机构在每个位置下的传力性能和舒适度, 同时定义人体自行车机构在整个运动空间的传力性能和舒适度的总体评价指标, 并绘制相应的性能图谱.

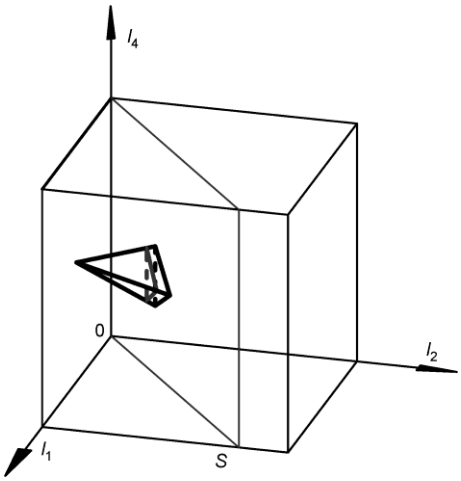

图 3　人体自行车机构设计空间: 四面体

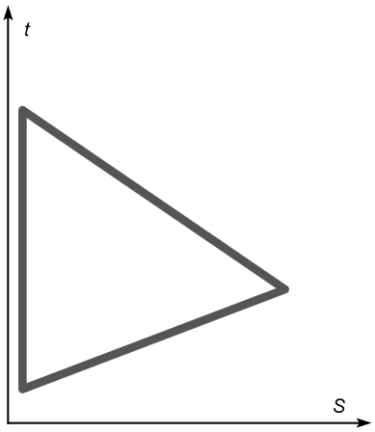

图 4　设计空间

l_1:l_2=a

3.2.1　局部传动系数(LTI)和全局传动系数(GTI)

传动角的大小直接影响着机构的传力性能. 传动角越大, 机构的传力性能越好. 因此, 定义一个基于传动角的性能参数对于分析机构性能十分重要. 利用机构中的传动角μ, 如图 2, 定义局部传动系数(Local Transmission Index, 简称 LTI)为

$$\chi_T=\sin\mu, \tag{17}$$

其中, $0°\leqslant\mu\leqslant 90°$, 则有: $0\leqslant\chi_T\leqslant 1$. 由于传动角越大, 传力性能越好, 效率越高, 所以, 对于 χ_T 越大越有利于骑行省力.

上述对于传动系数的定义是仅限于某一特定位置的, 则曲柄转一周的总体传力性能可以定义为全局传动系数(Global Transmission Index , 简称 GTI):

$$\Gamma_T = \int_{\varphi_3} \chi_T \mathrm{d}\varphi_3 \Big/ \int_{\varphi_3} \mathrm{d}\varphi_3, \tag{18}$$

其中φ_3 定义为机构的输出工作空间. 同样, $0 \leqslant \Gamma_T \leqslant 1$.

GTI 则表示这个机构在整个工作空间内力传动性能的整体评价, 且 GTI 的值越大, 机构在整个工作空间内的力传动性能越好, 人骑自行车就越省力.

3.2.2 局部疲劳系数(LTI)和全局疲劳系数(GSI)

在考虑骑行省力的同时, 还需要考虑骑行者的舒适度. 人在骑行时的舒适度主要取决于大腿 L_1 和小腿 L_2 之间的夹角, 即图 2 中膝关节夹角γ, 当γ取 60°~85°之间时, 人体是较为舒适的[9], 所以说, 在 L_3 转动一周中, L_1 和 L_2 的夹角γ应当尽量取在 60°到 85°之间. 这一数值可以由如下定义反映. 定义局部疲劳系数(Local Strain Index, 简称 LSI)为

$$\chi_S = \sin\gamma, \tag{19}$$

其中, γ =60°~85°时, 即χ_S=0.866~0.996, 人骑车比较舒服.

同理, 定义全局疲劳系数(Global Strain Index, 简称 GSI)为

$$\Gamma_S = \int_{\varphi_3} \chi_S \mathrm{d}\varphi_3 \Big/ \int_{\varphi_3} \mathrm{d}\varphi_3. \tag{20}$$

同样, GSI 在 0.866(sin60°)~0.996(sin85°)范围取值是比较理想的.

3.3 性能图谱

性能图谱是在有限的平面内表示性能与相关参数之间关系的图, 在机械设计领域被广泛采用. 针对本文研究的对象, 性能图谱需要在如图 4 所示的类似设计空间内绘制. 如前所述, 如果根据人自身条件来优化座高和曲柄, 则在优化过程中, 人的大小腿比例是确定的. 依据中国成年人体尺寸国家标准[11], 成年人(18~60 岁间)的大腿长度L_1平均为 505 mm, 小腿长度L_2平均为 403 mm, 因此取 a=L_1:L_2=1.25, 从而根据图 3 可以得到大小腿比例是 1.25 的人对应的设计空间. 依据上文对传动系数和疲劳系数, 以及相关角度的定义, 单边机构的 GTI 和 GSI 与无量纲参数之间的关系可以在设计空间内由其等值线图表示, 如图 5 和 6 所示.

从这两幅性能图谱, 可以得出以下关于大小腿长度比例是 1.25 的人的几点定性的结论. 1) 无论是 GTI 图谱还是 GSI 图谱, 在座高L_4较短的时候机构的力传递性能和舒适度都较差, 所以, 自行车座较高, 有利于省力和舒适感. 2) 根据 GSI 图谱, 座高L_4的值过大时, 虽然力传递性能较好, 但由于人在 GSI 为 0.866~0.996 间最为舒适, 即车座过高会降低舒适度. 所以, 一般而言, 如果是短距离骑行可以选择较大的座高, 有利于省力, 提高爆发力; 如果是长距离骑行, 则可以适当减小座高长度, 这样可以有效减少骑行

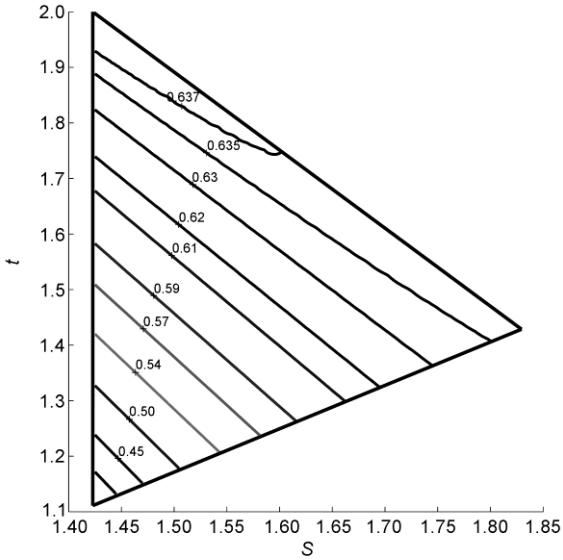

图 5 单边全局传动系数(GTI)性能图谱

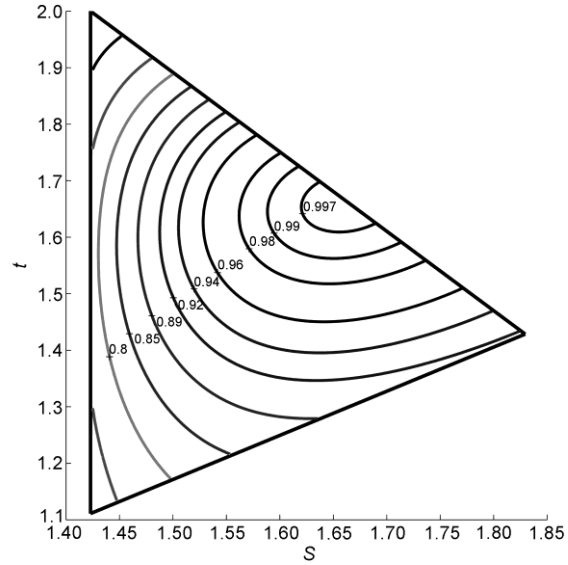

图 6 单边全局疲劳系数(GSI)性能图谱

者疲劳积累, 适合长时间的骑行. 当然, 对于不同座高和脚蹬曲柄的组合, 可能会有相同的 GTI, 在这种情况下, 就需要结合 GSI 进行选择判断. 除了 GTI 和 GSI 参数外, 在设计自行车时还会遇到车把手等设计问题, 它们也会影响舒适度, 不是本文讨论的内容, 这里仅仅涉及直接影响骑行动力等的相关参数.

4　优化设计方法

结合上文有关性能指标的定义与分析, 对于人体自行车机构的优化设计的具体步骤表述如下: 第一步, 测定购买自行车的人或者运动员的大腿长度 L_1 和小腿长度 L_2, 得到它们的比值 $a(a=L_1:L_2)$; 第二步, 利用比值 a 在图 3 的设计空间中对无量纲参数 l_1, l_2 和 l_4 进行坐标变换, 进而得到图 4 中的平面设计空间; 第三步, 通过计算性能指标 GTI 和 GSI, 在平面设计空间内绘出它们的性能图谱; 第四步, 选择适合骑行者的 GTI 和 GSI, 它们所包络的范围即为符合骑行者要求的各项设计指标的范围, 称之为优质尺度域; 第五步, 在满足要求的范围中选择某些点进行设计计算, 得到适合骑行者身材、舒适度等要求的座高和曲柄长度, 从而完成针对个人的自行车优化设计.

下面我们给出一个优化设计的实例. 假设骑行者的大、小腿长度比 a=1.25, 同时要求自行车的传动性能指标满足 GTI≥0.63, 并且疲劳性能指数参数满足 GSI≥0.96. 通过计算得到设计空间和符合性能指标 GTI 和 GSI 要求的等值线, 其包络的范围即为满足设计要求的优质尺度域, 如图 7 中的阴影区域所示.

在优质尺度域中选取一点 P(1.5916, 1.6121)进行设计, 且 P 点的 GTI 为 0.632, GSI 为 0.99. 由坐标变换式(15)和(16), A 点对应的四杆机构无量纲杆长为(1.2429, 0.9943, 0.1507, 1.6121). 再通过人体的大、小长度就可以得到座高和曲柄的长度了. 由于这里取 a=1.25, 由中国成年人人体尺寸的国家标准[11], 取大腿 L_1=500 mm, 小腿 L_2=400 mm, 则曲柄 L_3=60.6 mm, 座高 L_4=648.5 mm. 这样就设计出了满足骑行者要求的一款自行车的座高和曲柄.

5　基于优化设计的比较

为了比较具有不同参数机构的性能以证明优化设计的优劣, 同时验证性能图谱的正确性, 这里将选

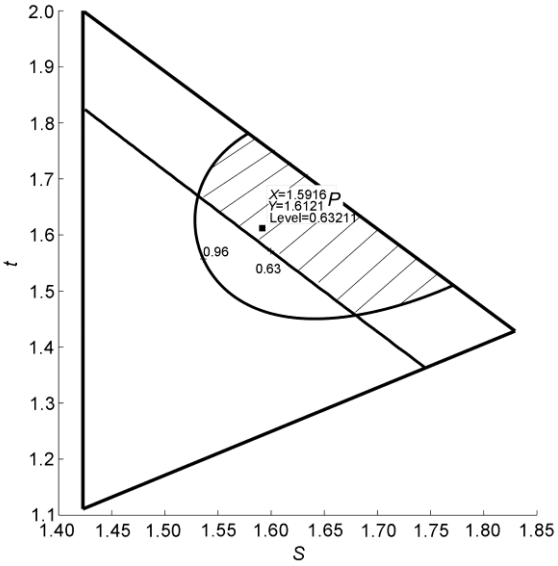

图 7　对于 GTI≥0.775 和 GSI≥0.95 的优质尺度域 (图中阴影部分)

择性能图谱中的两个点所对应的机构来进行比较. 为了使得比较更具有科学性且更有说服力, 在这里必须使得其他条件相同, 即: 1) 优化设计是对同一位骑行者进行的, 也就是两个机构的 L_1 和 L_2 的值分别相同, 那么, 两个机构的 a 也相同. 2) 曲柄长度相同, 这是因为在腿施加相同作用力的情况下, 曲柄长度相同, 那么力相对于曲柄中心的力矩也相同, 这样比较就可以消除因力矩不同而带来的比较方式不正确的影响. 3) 人体的疲劳度指数相同, 舒适感对于自行车运动员的影响很大, 有些机构虽然可以增加骑行的爆发力, 但是舒适感差很容易导致运动员疲劳, 同时也容易导致疲劳积累, 这样不利于运动员进行比赛.

基于以上考虑, 首先假设人体大腿和小腿的长度分别为 500 和 400 mm(这里的尺寸并不是严格按照人体尺寸, 而是为了计算方便取值的, 并不影响验证过程). 为了保证曲柄长度相同以及舒适度指标相同, 就必须在性能图谱中同时画出 GTI 曲线图谱和 GSI 曲线图谱(单边), 以及曲线 $l_3=kl_1$, 其中 k 可以为任意小于 1 的正数, 该曲线表示的是在任意一条曲线在 l_1 相同的情况下, 所对应的曲柄长度 l_3 都相同. 最终 GTI, GSI 和 $l_3=kl_1$ 曲线绘于一张图谱如图 8 所示.

图谱是基于 a=1.25 绘制而成的. 在图中选择两点 A(1.5286, 1.6179)和 B(1.6323, 1.4470), 其中 A 点的

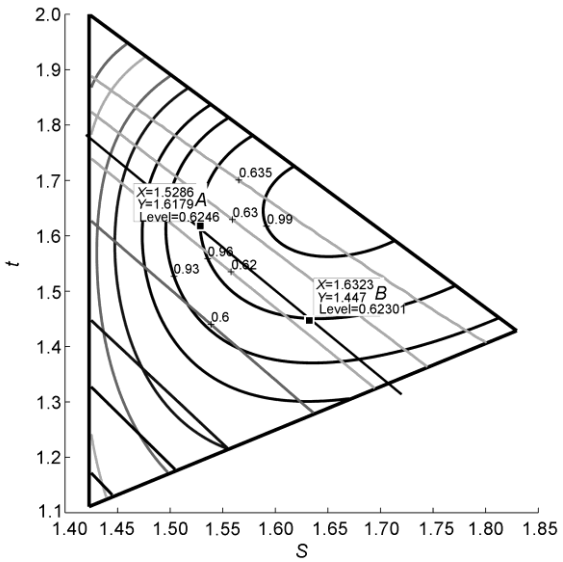

图 8　用 l_3:l_1=0.2 截取 GSI=0.96 等值线上两点用来设计对比

GTI 为 0.6246, GSI 为 0.96, B 点的 GTI 为 0.623, GSI 为 0.96. 由坐标变换式(15)和(16), A 点对应的四杆机构无量纲杆长为(1.1936, 0.9546, 0.2336, 1.6323), B 点对应的四杆机构无量纲杆长为(1.2746, 1.0197, 0.2587, 1.4470). 从而, 由 L_1=500 mm 和 L_2=400 mm 得到 A 点的物理尺寸为(500, 400, 100, 684), B 点的物理尺寸为(500, 400, 100, 568). 由此, A, B 两点满足上面三个条件. 假设自行车在骑行过程中受到定值外阻力的作用, 那么可以采用的比较方法有两种: 一种是在保持自行车匀速直线前行的条件下, 分析和计算人体通过大腿与小腿对曲柄施加的力的情况, 比较两个机构在曲柄旋转一周需要施加力的大小; 另一种是人骑自行车脚踏曲柄一周, 自行车能够前进的距离, 如果自行车机构更加省力, 那么在人对曲柄施加相同作用力的情况下, 脚踏曲柄旋转一周, 则做得功将更多, 自行车也将前进的更远, 这样比较两个机构做功多少, 前行远近即可分辨优劣.

为了便于对比两种设计的优略, 这里进行一些初始条件的赋值假设. 假设自行车车轮半径为 r=350 mm, 人体和车的总质量为 80 kg, 人在骑自行车时所受到的阻力为总质量的 0.02 倍(经验系数), 那么阻力为

$$F = m \times g \times f = 80 \times 10 \times 0.02 = 16\ \text{N}. \tag{21}$$

那么由摩擦力对于曲柄中心产生的阻力距的大小为

$$M = F \times r = 16 \times 0.35 = 5.6\ \text{N}\cdot\text{m}. \tag{22}$$

所以在如果不考虑其他影响因素的情况下, 由人施加给曲柄的作用力也应该为 6.5 Nm 以克服摩擦阻力, 那么所施加的力的大小为

$$F = \frac{M}{l_3 \sin\mu} = \frac{5.6}{0.1\sin\mu} = \frac{56}{\sin\mu}\ \text{N}, \tag{23}$$

其中, 角度μ即为曲柄和小腿所夹角度, 即传动角.

方案一. A, B 两点对应的机构所需要施加力的大小随着传动角的变化而不断变化. 当 L_3 绕 O 点旋转一周时, 所需要施加的力的平均值为

$$\overline{F_A} = 255\ \text{N}$$

$$\overline{F_B} = 267\ \text{N}$$

对比 $\overline{F_A}$ 和 $\overline{F_B}$ 的大小, 很容易发现 $\overline{F_A} < \overline{F_B}$, 也就是说 A 机构比 B 机构要更加省力.

方案二. 假设人施加在曲柄上的作用力为 F =50 N, 那么, 无论人骑的自行车如何, 他脚踏曲柄旋转一周所消耗大腿肌肉的能量是相等的. 而对于不同的自行车, 人所作的有用功却是不同的, 即为

$$W = \int_0^{2\pi} F l_3 \sin\mu \mathrm{d}\varphi_3. \tag{24}$$

由于本机构是一个单自由度机构, 那么每对应一个角度φ_3, 则就对应一个传动角μ, 故而可以根据φ_3的大小而求出传动角μ的大小. 对于 A 点对应的机构, 在曲柄旋转一周下所做的有用功为

$$W = \int_0^{2\pi} 50 \times 0.1 \sin\mu \mathrm{d}\varphi_3 = 19.5965\ \text{J}.$$

那么在外加阻力仍然为 5.6N 的情况下, 可以前行的距离为

$$S = \frac{W}{F} = \frac{22.6728}{5.6} = 3.4994\ \text{m}.$$

另一方面, 对于 B 点对应的机构, 在曲柄旋转一周下所做的有用功为

$$S = \int_0^{2\pi} 50 \times 0.1 \sin\mu \mathrm{d}\varphi_3 = 19.5653\ \text{J}.$$

那么在外加阻力仍然为 5.6N 的情况下, 可以前行的距离为

$$S = \frac{W}{F} = \frac{21.2926}{5.6} = 3.4938\ \text{m}.$$

从这里可以看出, 在输入力相同的情况下, A 点所对应的机构在曲柄旋转一周时可以做出更多的功, 效率更高, 即能使得自行车骑行的更远, 所以, 可以

看出机构 A 优化设计结果更好.

通过以上两种比较方式的比较, 可以说明 A 机构比 B 机构更为省力. 从图谱中可以得知, A 机构的 GTI 要比 B 机构的大 0.0016, 确实会达到省力的目的. 这样, 就验证了本文性能指标定义、性能图谱和优化设计方法的正确性.

6 结论

本文通过将人体结构(大腿、小腿)、自行车的脚蹬曲柄和座高进行机构化, 抽象成一个双曲柄摇杆机构. 从机构运动学原理角度出发, 提出了针对不同人的大腿、小腿的长度比来设计曲柄和座高参数的优化设计方法, 从而可以达到"量身定做"自行车的目的. 首先, 基于机构设计和人体疲劳影响原理, 定义了机构的传动系数和疲劳系数, 然后, 基于机构参数设计空间概念, 综合考虑骑行省力和人体舒适度两大因素进行优化设计. 不同于前人所采用的基于人体生理学及统计学的设计方法, 文章利用机构学原理来进行分析和讨论, 最终从理论的角度总结出人体自行车机构省力、舒适的优化方案, 为根据人体生理尺寸选取自行车提供了一种优选方法.

参考文献

1 邓益民, 张仲源. 自行车车架结构尺寸的计算机辅助设计. 微机发展, 1996, 6(4): 31–34
2 张聪敏. 运动自行车车架量身定做方法的研究. 北京: 北京工业大学, 2009. 5
3 Mclean B D, Parker A W. An anthropometric analysis of elite Australian track cyclists. J Sports Sci, 1989, 7(3): 247–255
4 Henri H C, Christiaans M, Bremner A. Comfort on bicycles and the validity of a commericial bicycle fitting system. Appl Ergonom, 1998, 29(3): 201–211
5 Sharp R S. On the stability and control of the bicycle. Appl Mech Rev, 2008, 61(11): 060803
6 http://www.sevencycles.com/buildingbike/customization/.
7 吴小凡. 基于人机工程学的自行车设计方法研究与应用. 天津: 天津大学, 2008
8 孙科. 不同座高对自行车运动员下肢工作状态的影响. 北京: 北京体育大学, 2007
9 闻邦椿. 机械设计手册(第五版)第六卷. 北京: 机械工业出版社, 2010
10 Liu X J, Wang J S. A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms. Mech Machine Theory, 2007, 42(9): 1210–1224
11 中华人民共和国成年人人体尺寸国家标准. GB10000—88