

文章编号: 1001-3806(2006)03-0255-03

激光器虚拟样机与物理样机方案决策研究

熊智文¹, 李刚炎^{2*}

(1. 南昌大学 机电工程学院, 南昌 330029; 2 武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070)

摘要: 对于具体激光器产品的设计, 技术方案决策是一个复杂的过程, 通常只能定性分析与逻辑判断, 难以定量计算和分析。为此, 采用层次分析法, 以高功率横流 CO₂ 激光器为例, 对其设计方案的决策作出一个精确的定量分析。通过对层次结构模型中措施层、准则层、目标层的分析, 得出物理样机和虚拟样机两方案在准则层和目标层的数值对比关系, 用数值计算结果为依据进行方案决策。结果表明, 采用虚拟样机技术来研发激光器等比较特殊的产品具有物理样机无法比拟的优点。

关键词: 激光器; 虚拟样机; 物理样机; 层次分析法

中图分类号: TN248.2⁺2 **文献标识码:** A

Scheme decision analysis between physical prototype and virtual prototype for laser

XIONG Zhiwen¹, LI Gangyan²

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering Nanchang University, Nanchang 330029, China; 2. School of Mechanical and Electronics Engineering Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract Technology scheme decision is a complex process for a real laser product. Usually, qualitative analysis and logical judgment are used in this process. It's difficult to analyze in quantitative way. With high power crosscurrent CO₂ laser as an example, analysis of hierarchy process (AHP) is used for decision process between physical prototype (PP) and virtual prototype (VP) in a quantitative way. Through analyzing measures, criteria and target in hierarchy, the quantitative comparative relation between PP and VP in criteria layer and target layer are obtained and it is used to make scheme decision. Results show that it's better for laser development with PP than VP.

Key words laser; virtual prototype; physical prototype; analysis of hierarchy process

引 言

虚拟样机技术 (virtual prototype, VP) 是一种以人为中心的产品开发过程优化方法与虚拟现实技术相结合的技术。它将分布的、来自不同学科领域的模型集成在一起, 不依赖物理样机 (physical prototype, PP) 就可并行协同地进行有效、可验证的设计工作, 从而提高产品开发过程中开发者与开发者、产品和客户的交互, 使设计面向过程, 面向市场^[1]。

虚拟样机通过用计算机模型取代实物模型, 大大缩短了样机的试制等待时间, 降低了样机的试制成本, 提高了设计者的自由度。但是, 目前虚拟样机还不能完全取代物理样机, 在不同学科, 不同知识领域, 描述不同的产品的数学模型成熟度不同, 仿真方法应用情

况不同, 使得在某些行业某些产品上, 还无法采用虚拟样机技术或是采用虚拟样机技术不如物理样机有利。因此, 针对具体产品, 并非是一律采用虚拟样机技术就比物理样机技术好, 中间有一个可能性大小和如有可能, 是否最优的方案决策过程^[2]。

针对具体产品, 采用某种新的制造技术取代旧的制造技术究竟有多大的优越性, 传统的作法是定性分析, 逻辑判断, 之后投入生产, 进行事后验证。在这种情况下, 无法作出精确的定量分析, 降低了决策的科学性和说服力。为解决这一问题, 本文中借鉴制造系统的五角形决策目标框架^[3], 采用层次分析法, 进行方案决策的量化, 并将该方法应用于高功率横流 CO₂ 激光器的虚拟样机和物理样机方案决策过程中, 计算并分析了采用虚拟样机与采用物理样机的决策目标对比, 得到具体的数值结果。

1 材料与方 法

一种新的制造技术在一定的背景下才会出现, 是为了解决一定的生产实践问题的。先进制造技术常常

基金项目: 武汉市科技计划资助项目 (2002300513305)

作者简介: 熊智文 (1975), 男, 博士研究生, 主要研究方向为制造信息化、数字制造和虚拟样机技术。

* 通讯联系人。E-mail: G.angyan@mail.whut.edu.cn

收稿日期: 2005-04-13; 收到修改稿日期: 2005-05-25

是为了解决制造系统中出现的技术需求而产生,必须在与之相匹配的制造模式中使用才能充分发挥作用,收到实效。是否采用、如何采用必须结合当时的技术背景、经济背景、产品的特征等方面的因素,综合加以考虑。不同的产品,其用户群不一样,生产模式也不一样,导致先进制造技术产生的作用也不一样。在考虑采用什么样的制造模式来经营、管理和优化利用各种资源时,获取系统投入的最大增值是主要设计目标之一。

目前,进行设计活动时所追求的目标是:尽可能低的制造成本,尽可能快的市场响应,尽可能高的产品质量,尽可能高的制造系统柔性 and 尽可能小的生态环境影响,即:成本 (cost C)、时间 (time T)、质量 (quality Q)、柔性 (flexibility, F) 和环境性 (environment E)^[3]。

针对高功率横流 CO₂ 激光器,其生产方式是单件小批量生产,用户群比较集中在一些特殊行业,品种不太多。在 C, T, Q, F 和 E 5个主要决策目标中,对柔性的要求大为降低,而服务 (service S) 则是现代设计时必须考虑的一个重要方面。鉴于此,用服务 S 替换传统的柔性 F ,形成针对高功率横流 CO₂ 激光器的制造系统决策目标框架,如图 1 示。在这 5 个决策目标中,

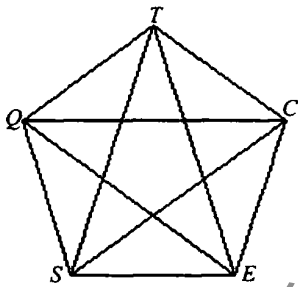


Fig 1 Decision target structure with pentagonal shape for manufacturing system

采用物理样机技术和采用虚拟样机技术各有优劣。在高功率横流 CO₂ 激光器的设计过程中,采用虚拟样机技术取代物理样机技术,能否使整个设计全局更最优,而不是局部更优?通常作法是采用新技术前进行定性分析和逻辑判断,得出一个定性的结论,却无法给出更多更具体更详细的说明。

为了量化地求解上述问题,作者采用层次分析法 (analysis of hierarchy process AHP)^[3],模拟分解、判断、综合的思维过程,将这些定性分析和逻辑判断进行量化,用数值计算结果作为依据进行决策。图 2 为层

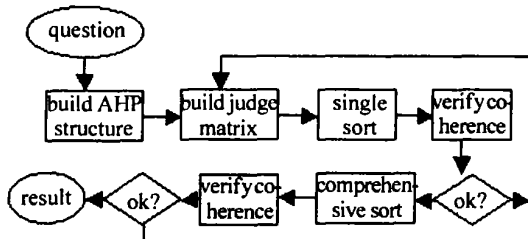


Fig 2 Decision flow chart in AHP

次分析法进行决策的步骤。该方法的实质是将决策主体对复杂系统的评价思维过程层次化和数量化。在该过程中,最大的特点是两个循环,内循环以保证单层次排序结果的可靠性,外循环保证总排序结果的可靠性。

2 研究结果

2.1 建立高功率横流 CO₂ 激光器设计方案选择的层次结构模型^[4]

图 3 为该层次结构模型,其中,高功率横流 CO₂ 激光器设计方式的决策是总目标,属于最高层。为了实现决策总目标,在实际决策过程中,考虑到目前企业的主要竞争力体现在 T, Q, C, S, E 5 个方面,因此,将其作为中间层。本文中讨论的范围限于物理样机技术与虚拟样机技术之间,因此,最底层的决策变量就是物理样机和虚拟样机两个待选方案。

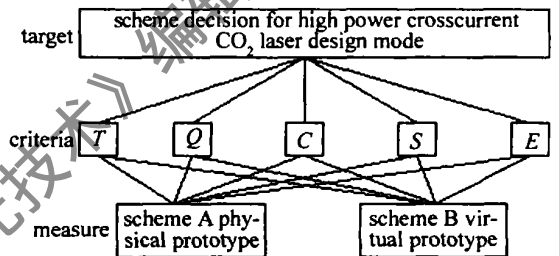


Fig 3 Hierarchy model of scheme decision for high power crosscurrent CO₂ laser design mode

决策变量:用 $X = (x_1, x_2)$ 来描述虚拟样机与物理样机的决策问题,其中 x_1 代表物理样机技术, x_2 代表虚拟样机技术。当 $X = (1, 0)$ 时,表示采用物理样机技术;当 $X = (0, 1)$ 时,表示采用虚拟样机技术, $x_1 + x_2 = 1$ 。

决策目标: T, Q, C, S, E 的全局最优,即获得 $\min T, \min Q, \min C, \min S, \min E$,具体讲就是时间尽可能短,质量尽可能高,成本尽可能低,服务尽可能好,环境影响尽可能小,在这里用 $T(x_1, x_2), Q(x_1, x_2), C(x_1, x_2), S(x_1, x_2), E(x_1, x_2)$ 来表示采用不同方案 x_1 和 x_2 时的决策目标结果。

2.2 决策变量与目标之间的关系分析^[5,6]

为了找出决策变量和决策目标之间的联系,针对高功率横流 CO₂ 激光器,通过咨询专家与厂家实际情况调查,得出高功率横流 CO₂ 激光器在不同决策变量下决策目标对比关系,如表 1 所示。

Table 1 Comparative relation between decision variants in decision targets

	PP	comparison operator	VP
T	$T(1, 0)$	\gg	$T(0, 1)$
Q	$Q(1, 0)$	$<$	$Q(0, 1)$
C	$C(1, 0)$	\gg	$C(0, 1)$
S	$S(1, 0)$	$>$	$S(0, 1)$
E	$E(1, 0)$	$=$	$E(0, 1)$

从表中可以看出,采用虚拟样机技术与采用物理样机技术,在时间 T 和成本 C 两个方面,前者明显优于后者;在质量 Q 方面,前者略优于后者;在环境影响 E 方面,前者与后者效果相差不大;在服务 S 方面,前者不如后者。

2.3 层次单排序

根据判断矩阵,通过计算相对重要程度,对本层次的各要素相对于上一层的某要素进行重要度排序^[7]。准则层对目标层的判断矩阵 A 如下所示:

	T	Q	C	S	E
T	1	3	1	5	5
Q	1/3	1	1/3	3	3
C	1	3	1	5	5
S	1/5	1/3	1/5	1	1
E	1/5	1/3	1/5	1	1

在下列计算中^[8,9], M 表示判断矩阵每一行诸元素的乘积, \bar{W} 表示 M 的 n 次方根, n 为判断矩阵的阶数, W 为 \bar{W} 的归一化处理结果, λ_{max} 为判断矩阵的最大特征根, C' 为判断矩阵的一致性指标, R 为多阶判断矩阵的平均一致性指标, C 为判断矩阵的一致性比较。层次排序的结果见表 2。

Table 2 Sort result of criteria layer to target layer

	M	\bar{W}	W	$A \times W$
T	75	2.3714	0.3604	1.8143
Q	0.9801	0.9960	0.1514	0.7729
C	75	2.3714	0.3604	1.8143
S	0.0132	0.4208	0.0640	0.3220
E	0.0132	0.4208	0.0640	0.3220

根据表 2 的结果,通过计算可以求得: $\lambda_{max} = 5.0492$, $C' = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) = (5.0492 - 5) / (5 - 1) = 0.0123$, $C = C' / R = 0.0123 / 1.12 = 0.011 < 0.1$ 。

结果表明,该相对重要度可被接受。同样道理,可得以下结果。

措施层对准则层 T 的判断矩阵及层次单排序见表 3。 $\lambda_{max} = 2$, $C' = 0$

Table 3 Sort result of measure layer to criteria T

criteria T	PP	VP	M	\bar{W}	W	$A \times W$
PP	1	1/5	1/5	0.447	0.1667	0.334
VP	5	1	5	2.236	0.8333	1.667

措施层对准则层 Q 的判断矩阵及层次单排序见表 4。 $\lambda_{max} = 2$, $C' = 0$

Table 4 Sort result of measure layer to criteria Q

criteria Q	PP	VP	M	\bar{W}	W	$A \times W$
PP	1	1/3	1/3	0.577	0.25	0.5
VP	3	1	3	1.732	0.75	1.5

措施层对准则层 C 的判断矩阵及层次单排序见表 5。 $\lambda_{max} = 2$, $C' = 0$

Table 5 Sort result of measure layer to criteria C

criteria C	PP	VP	M	\bar{W}	W	$A \times W$
PP	1	1/5	0.2	0.447	0.1667	0.334
VP	5	1	5	2.236	0.8333	1.667

措施层对准则层 S 的判断矩阵及层次单排序见表 6。 $\lambda_{max} = 2$, $C' = 0$

Table 6 Sort result of measure layer to criteria S

criteria S	PP	VP	M	\bar{W}	W	$A \times W$
PP	1	1/3	1/3	0.577	0.25	0.5
VP	3	1	3	1.732	0.75	1.5

措施层对准则层 E 的判断矩阵及层次单排序见表 7。 $\lambda_{max} = 2$, $C' = 0$

Table 7 Sort result of measure layer to criteria E

criteria E	PP	VP	M	\bar{W}	W	$A \times W$
PP	1	1	1	1	0.5	1
VP	1	1	1	1	0.5	1

2.4 层次总排序

层次总排序见表 8。 $C' = 0$

Table 8 Comprehensive sort result of measure layer to target layer

target	T	Q	C	S	E	comprehensive sort
PP	0.3604	0.1524	0.3604	0.0640	0.0640	0.2063
VP	0.6396	0.8476	0.6396	0.9360	0.9360	0.4306

根据层次总排序的结果可以得出结论,针对高功率横流 CO_2 激光器,选择虚拟样机技术优于选择物理样机技术。

3 结论

结合高功率横流 CO_2 激光器产品的特点和当前制造业发展的特点,对原有的制造系统五角形制造决策目标框架进行了适应性改造,用服务 S 替代原有的灵活性 F 作为一个决策目标分量,更好地体现了目前制造发展趋势,建立了适合高功率横流 CO_2 激光器产品特点的制造决策目标框架。在此基础上,采用层次分析法对该模型进行量化求解,得出精确的数据,说明针对该产品采用虚拟样机技术比物理样机技术更优。

参考文献

[1] ZHANG Sh Q, LI Y, SUN Y. Introduction of modern manufacturing [M]. Beijing Science Press, 2003. 357~360 (in Chinese).
 [2] XIONG G L, GUO B, CHENG X B et al. Collaborative simulation & virtual prototyping [M]. Beijing Tsinghua University Press, 2004. 34~38 (in Chinese).
 [3] LIU F, ZHANG X D, YANG D. Manufacturing systems engineering [M]. 2nd ed. Beijing National Defense Industry Press, 2000. 120~140 (in Chinese).

程中面形位置的变化情况,如图 6 所示,选取的 6 个时刻分别对应第 33, 40, 47, 55, 62, 69 帧(对应开始拍摄后的第 8, 25ms, 10ms, 11.75ms, 13.75ms, 15.5ms, 17.25ms)。图 6c 和图 6d 分别对应图 6a 和图 6b 中白色标线上的变形量在这 6 个时刻的变化情况,可以看到当玻璃发生震动时,玻璃虽没发生破裂,但位置已发生移动,玻璃破裂后,分成两块,且带有一定的旋转。

4 讨论

傅里叶变换轮廓术只需一帧变形条纹图就能恢复出物体的三维面形的特点使得其在动态过程三维面形测量中独具优点,但在冲击、爆轰等动态过程的研究中,被测三维表面将发生破裂及碎片飞散等过程^[9],为动态过程的三维重建带来困难。本文中提出了一种破裂的动态表面的三维重建方法,这种方法要点是利用条纹图中裂缝的信息,首先生成一个三维二元控制模板,在该模板的控制下进行三维相位展开。文中以玻璃破裂过程动态面形的三维测量为例,表明了该方法能正确恢复破裂过程面形及其动态变化过程;实验系统的重建精度取决于图像采集系统的拍摄频率,若拍摄频率足够快,采样时间满足抽样定理,则系统的测量精度与传统的 FTP 方法的测量精度相同,约为等效波长的 $1/30$ ^[10, 11],若采样时间不满足抽样定理,则此方法不能正确恢复出物体的面形。如果采用更高帧频的图像探测器,作者提出的方法可望用于冲击、爆轰

等动态过程的三维面形重建中。

参 考 文 献

- [1] TAKEDA M, MUTOH H, KOBAYASHI S. Fourier transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J O S A*, 1982, 72(1): 156~ 160.
- [2] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(24): 3977~ 3982.
- [3] SU X Y, CHEN W J, ZHANG Q C. Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(1): 49~ 64.
- [4] WU Ch C, SU X Y. Dynamic 3-D shape detected [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 1996, 7(5): 273~ 278(in Chinese).
- [5] ZHANG Q C, SU X Y. An optical measurement of vortex shape at a free surface [J]. *Opt & Laser Technol*, 2002, 34(2): 107~ 113.
- [6] REN Sh Q, FANG Q. Two-channel phase measuring profilometry used in dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(4): 452~ 455(in Chinese).
- [7] JUDGE T R, BRYANSTON-CROSS P J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1994, 21(4): 199~ 239.
- [8] JIANG Zh Y, MAO H, FENG Ch Y. Phase unwrapping algorithm based on breadth-first searching [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(3): 312~ 316(in Chinese).
- [9] TAN X X. OE techniques in experiments of shock wave and detonation physics [J]. *Laser & Infrared*, 1996, 26(3): 210~ 212(in Chinese).
- [10] CHEN W J, SU X Y. A new method for improving measuring accuracy of Fourier transform profilometry [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2002, 29(1): 19~ 22(in Chinese).
- [11] ZHANG L, LU S N, LIN D Y *et al*. The progress of extracting phase information based on spatial carrier fringe pattern analysis [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 90~ 93(in Chinese).
- [4] GUO Y J. Comprehensive evaluation theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2002, 71~ 76(in Chinese).
- [5] CHENG Ch, MA Y W. Investigation of CO₂ laser resonator with maximum output power [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(5): 346~ 349(in Chinese).
- [6] YU J CAIGH, YANG Q M *et al*. A new method stabilize output intensity of a laser [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(6): 440~ 443(in Chinese).
- [7] ZHOU M L. Similarity engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 1998, 141~ 143(in Chinese).
- [8] WU B Sh, FANG M, LI R T *et al*. Study on validity of virtual prototype based on similarity theory [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(12): 1018~ 1021(in Chinese).
- [9] WANG Y J, LI G Y, XIONG Zh W *et al*. Study on the calculating method of similarity degree between virtual prototype and physical prototype [J]. *Machinery*, 2004, 31(3): 10~ 12(in Chinese).

(上接第 257 页)