

文章编号: 2095-4980(2024)01-0075-05

复杂光机系统综合性能评估方法

葛成良

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 作为涉及光、机、电、控、热、气、液等多个领域的复杂光机系统, 如何对其进行综合性能评估一直是难以解决的关键技术问题。针对该问题, 通过分层分析并结合熵值、灰色和模糊评估等方法, 提出了能够直观反映复杂光机系统的评估因子, 即 G 因子。通过 G 因子, 可直观地对复杂光机系统的综合性能进行评估, 并可对比不同光机系统的综合性能; 同时在评估过程中, 也可对复杂光机系统的某个或几个关键参数进行对比分析。 G 因子提供了一种能够反映复杂光机系统综合性能的直观参数, 为复杂光机系统的综合性能评估及相关系统研制提供了技术支撑。

关键词: G 因子; 性能评估; 复杂光机系统; 指标集; 权重因子

中图分类号: TN24

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021416

Performance assessment methods of complicated opto-mechanical system

GE Chengliang

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For a complex opto-mechanical system related with optics, mechanics, electronics, control, thermodynamics, gas, liquid, etc, it is an unsolved key problem that how to assess the performance of complicated opto-mechanical system. Herein, combined with Analytic Hierarchy Process (AHP) method, grey method, fuzzy method, etc., one intuitionistic G -factor is presented to evaluate the performance of the system. The G -factor has only one value and can be a direct token of the whole system. Through the statistic progress, it can compare single parameter with that of other system.

Keywords: G -factor; performance assessment; complicated opto-mechanical system; parameter set; weight factor

当前, 主要的系统综合性能评估方法^[1-13]包括层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)、逼近与理想解的排序方法(理想点法、双基点法、逼近理想解法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS))、线性分配法、消去与选择转换(Elimination et Choice Translating Reality, ELECTRE)法、偏好顺序结构评估(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations, PROMETHEE)法、熵权法、模糊评估法、神经网络法、多属性法、灰色理论法等。如, 吴小萍等^[1]提出了一种复杂系统综合评价方法, 用于高速客运通道方案选择; 王建军等^[2]结合 AHP 法、ELECTRE 法、PROMETHEE 法提出了一种复杂系统综合评价方法, 用于信息系统项目外包决策; 贺北方等^[4]提出了灰色聚类分析法, 用于水库正常蓄水位方案设计评估; 张迪等^[8]提出了基于网络分析(Analytic Network Process, ANP)法的有限层次方法用于体系能力评估; 梁家林等^[9]提出了作战环的思想用于体系能力评估; 陈雷雨等^[10]提出了融合多元信息的方法用于装备性能评估; 王玉恒等^[11]对高能激光系统效能综合评价模型进行了概念研究; 杨菁等^[12]运用多目标决策理论和加权综合法, 初步建立了多级综合评估数学模型, 以期对复杂激光装置的总体设计做出较客观的分析评价; 李君雅等^[13]运用 TOPSIS 方法开展模糊风险优先系数(Risk Priority Number, RPN)评价方法研究, 以提高 RPN 值的可信度, 为风险决策提供更可靠的依据。上述方法和文献, 提供了比较有价值的参考思路, 但部分方法未考虑单个性能指标的重要性(权重), 部分方法未对所有指标进行全面分析。其最终评价结果通常是一个矩阵, 不够直观, 不适用于新型的复杂光机系统。

本文通过分层分析并结合熵值、灰色和模糊评估等方法, 提出了能够直观反映复杂光机系统的评估因子, 即 G 因子。通过该因子, 可直观地对复杂光机系统的综合性能进行评估, 并可对比不同光机系统的综合性能。

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-03-23

同时在评估过程中，也可对复杂光机系统的某个或几个关键参数进行对比分析。本文提供了一种能够反映复杂光机系统综合性能的直观参数，为复杂光机系统的综合性能评估及相关系统研制提供了技术支撑。

1 复杂光机系统性能架构

复杂光机系统是指涉及光学、机械、电子、控制和热管理等多学科的新型系统，通常处于复杂的应用环境中。一个典型的激光测距系统主要包括控制系统、电源系统、热管理系统、激光光源、光学耦合系统、激光发射光学系统、激光接收光学系统、光电探测器、信号采集处理系统和平台结构系统部分组成，见图1。从严格意义上说，激光测距系统还不能被完全认为是一个复杂光机系统，其性能指标体系已涉及多种类型、数十项技术和功能指标。因此，鉴于复杂光机系统涉及数十项不同类型指标和功能参数，如何实现同型号不同批次以及不同型号复杂光机系统的综合性能评估是亟需解决的难题。基于上述文献调研分析，目前还没有专用于复杂光机系统、易于实现的综合性能评估方法。

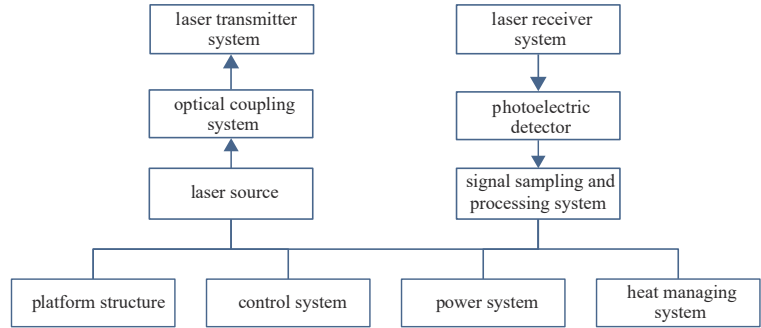


Fig.1 Schematic of typical laser ranger
图1 典型激光测距系统示意图

对复杂光机系统的性能进行综合评价，必须统筹考虑多方面的因素。复杂光机系统包含光学系统、平台系统、电子学系统、热管理系统、电源系统等多个分系统，系统复杂，涉及较多的指标类型和数量。为全面准确地评估系统的性能，需对复杂光机系统的性能指标进行全面分析。一个比较有效的方法是对系统性能指标进行分层分类处理。性能指标的分层分类不但能够全面梳理全系统的关键性能指标，而且有助于在后续处理中确定该指标是否为正向/负向指标，有助于专家系统根据指标的特性确定其在评价体系中的权重。

本文将复杂光机系统的性能指标分为三层三类，见图2。第一层为系统的综合性能，后续将通过综合性能评估G因子来表征；第二层是针对系统自身、用户和环境的具体分类，体现了系统-用户-环境的相互影响和融合；第三层为具体的关键指标参数，反映了系统、使用和环境三个方面的具体特性。

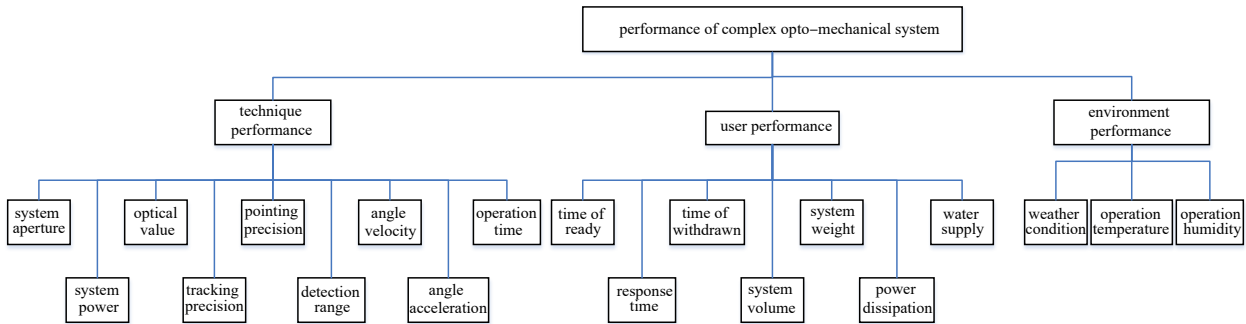


Fig.2 Model of performance assessment of complicated opto-mechanical system
图2 复杂光机系统综合性能评估模型

通过对综合性能评估G因子的推导阐述对复杂光机系统综合性能的评价。值得注意的是，即使是复杂光机系统也存在相当的差异性，如高功率系统与低功率系统存在差异、不同应用平台的复杂光机系统也存在差异。因此，上述指标体系不是一个确定的指标集，并且即使是一个确定的复杂光机系统，上述指标体系也还是一个典型的指标集。本文提出综合性能评估G因子并通过该因子对典型复杂光机系统进行评估，以说明方法的有效性。

2 综合性能评估G因子

参考文献所描述的性能综合评估方法未能将系统的综合性能归纳为一个指标参数，不利于方法的具体应用和推广。本文提出了复杂光机系统综合性能评估G因子，期望通过G因子单一指标直观描述不同光机系统的综合性能，以利于复杂光机系统的自评估和第三方评估，为系统研制和验收提供清晰准确的评估方法。

2.1 评估系统

复杂光机系统由于其复杂性和特殊性，部分系统还属于比较前沿的领域。因此，目前用于系统性能评估的指标体系还没有一个确定的、被广泛认可的指标集，还需通过该领域的专家构建专家系统来确定指标集。用于系统性能评估的指标存在多样性，并且不同指标对系统性能的影响程度也不一样，也需要专家系统对性能指标的权重进行确定，构建权重集。用于性能评估的单一系统指标都有一个实测的确定数值，对于某些指标，指标值越大，系统性能越好，如系统功率，这一类指标称之为正向指标；对于某些指标，数值越大，系统性能越差，如系统功耗，这一类指标称之为负向指标。这需要通过专家系统确定指标的方向集。此外，不同指标其量纲不一样，如功率的量纲为 W ，口径的量纲为 mm ，不同的量纲无法进行直接比较和运算，需要专家系统构建性能指标标准集，对用于性能评估的指标集进行归一化。

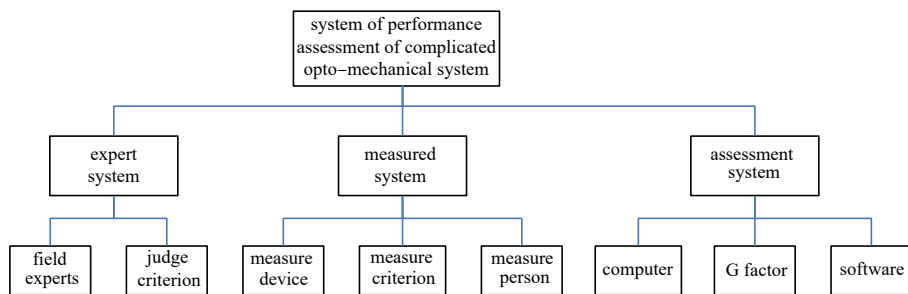


Fig.3 System diagram of performance assessment of complicated opto-mechanical system
图3 复杂光机系统综合性能评估系统

一个典型的综合性能评估系统包括专家系统、实测系统和评估系统等部分，见图3。其中，专家系统由领域专家及相应的判断准则组成，通过适当形式确定系统性能评估的指标集、标准集、权重集和方向集。实测系统由测试设备、测试准则和专业测试人员组成，通过实测确定系统性能评估指标集的各项指标。评估系统由计算机、处理软件和算法(G 因子)组成，通过数据处理以数据图表形式给出系统性能评估结果。

2.2 评估流程

复杂光机系统综合性能评估流程，见图4。

- 1) 确定指标集：通过专家系统，优选系统指标，建立系统综合性能评估的指标集。
- 2) 实测指标集：通过实测系统，对指标集中系统的各项指标进行实际测量，获得实测指标集。
- 3) 确定指标标准集：通过专家系统，对指标集的每个指标确定一个参考标准指标值，建立指标标准集。
- 4) 确定指标权重集：通过专家系统，对指标集的每个指标确定一个参考权重值，以体现不同指标在性能评估体系中所起的作用，并建立指标权重集。
- 5) 确定指标方向集：通过专家系统，对指标集的每个指标确定其方向性，以体现该指标数值大小变化所对应的性能优劣变化，并建立指标方向集。原则上，对于正向指标，数值越大，性能越好；对于负向指标，数值越大，性能越差。
- 6) 指标归一化：包含指标无量纲化和指标取向归一化。指标无量纲化是指通过指标标准集，对实测指标集的指标，如功率、口径、光束质量等各个具有不同量纲的指标进行归一化处理；指标取向归一化是指对于正向指标、负向指标进行归一化处理。
- 7) 指标权重化：通过指标权重集，对归一化指标集的每个指标赋予相应的权重。

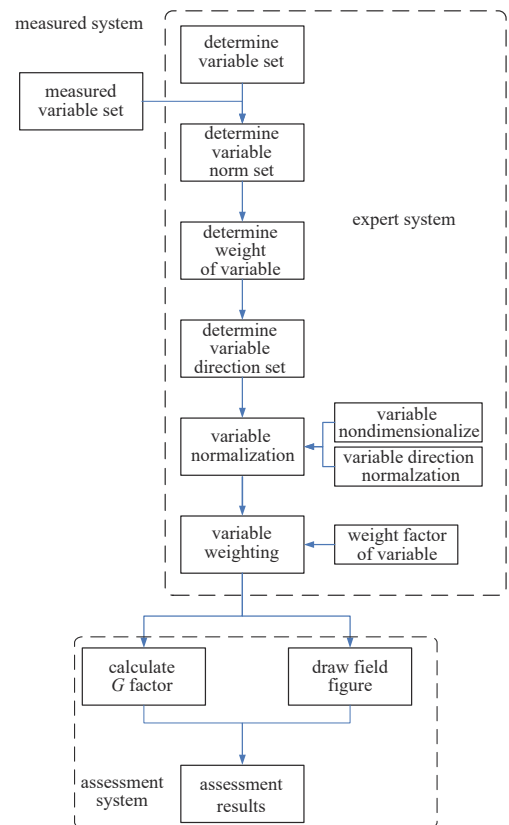


Fig.4 Flow chart of performance assessment of complicated opto-mechanical system
图4 复杂光机系统综合性能评估流程

8) 计算 G 因子: 通过评估系统, 根据 G 因子表达式, 计算系统的 G 因子, 获得不同系统的 G 因子的数值。 G 因子数值的大小表征了系统综合性能的优劣。

9) 区域雷达图: 通过评估系统, 绘制系统指标参数的区域雷达图, 通过该图单个指标的形态和区域形态, 直观表征系统的综合性能。

10) 完成评估。

2.3 G 因子

复杂光机系统的指标体系较为复杂, 不同指标表征的物理意义存在明显差异, 且指标数值的大小也具有明显不同的意义。本方法通过专家系统确定用于系统综合性能评估的指标集, 依据判断准则确定系统指标标准集(矩阵) A , 其中每个指标为 $a_i(i=1,2,3,\dots,n)$, n 为用来进行系统评估的指标数量。即

$$A = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n] \quad (1)$$

对于一个具体的复杂光机系统, 通过实测系统可以获得该系统的实测指标, 构成实测指标集 B , 其中每个实测指标为 $b_i(i=1,2,3,\dots,n)$, 且与指标标准集 A 一一对应。即

$$B = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_n] \quad (2)$$

实际上, 复杂光机系统的复杂性也体现在其具体指标具有一定的“方向性”。因此需要对于每个具体指标确定其具体方向, 即正向指标、负向指标, 构建指标方向集 C , 其中每个方向因子为 $c_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 。即

$$C = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_n] \quad (3)$$

不同类型的指标, 由于其量纲和所表征的物理意义不同, 难以直接汇总进行评价。可以依据指标标准集, 对实测指标集进行去量纲化, 暂时忽略不同类型指标量纲和物理意义的影响。去量纲化并考虑每个指标的方向性后, 形成无量纲的指标集 E 。指标集 E 的每个指标为 $e_i(i=1,2,3,\dots,n)$:

$$e_i = (b_i/a_i)c_i \quad (4)$$

不同的指标代表着不同的权重。通过专家系统确定每个指标的权重值, 构成权重因子集(矩阵) D , 其中每个权重因子为 $d_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 。即

$$D = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_n] \quad (5)$$

综上, 定义 G 因子为:

$$G = 0.5 \sin \frac{2\pi}{n} \left(e_n d_n e_1 d_1 + \sum_{i=1}^{n-1} e_i d_i e_{i+1} d_{i+1} \right) \quad (6)$$

式中 $n > 4$ 。这是避免出现负值的情况, 实际上系统指标的数量远远大于 4。因此, 本项约束通常可以忽略。

3 典型模型分析

介绍 2 个综合性能评估的实例模型, 通过 G 因子对其综合性能进行评估。2 个系统分别为系统 A 和系统 B, 由于众所周知的原因, 选择 12 个关键参数并将其命名为参数 1、参数 2、...、参数 12, 即指标集 {参数 1, 参数 2, ..., 参数 12}。上述设置不影响对 G 因子方法的评判。2 个系统归一化后的实测指标集、权重因子集、正负向见表 1。

计算后得到的 2 个系统的 G 因子值见表 2。通过 G 因子值, 可以直接评估系统 B 的性能优于系统 A。

2 个系统的区域雷达图见图 5。通过区域雷达图, 也可以对比 2 个系统各项指标的优劣。

表 1 系统 A 和系统 B 归一化后的指标集和权重因子及其方向性
Table 1 Normalized parameter collection, weight factor and direction of system A and system B

parameter	system A	system B	weight factor	direction
1	0.43	0.6	0.2	+
2	0.25	0.3	0.4	+
3	0.25	0.3	0.3	+
4	1.00	1.2	0.6	+
5	1.00	1.2	0.7	+
6	1.00	1.2	0.6	+
7	0.71	1.0	0.5	+
8	1.00	1.2	0.4	+
9	0.88	1.0	0.3	+
10	0.71	1.0	0.5	-
11	1.00	1.2	0.6	-
12	0.88	1.0	0.4	-

表 2 系统 A 和系统 B 的 G 因子

Table 2 G factor of system A and system B

	system A	system B
G factor	0.48	0.72

4 结论

本文针对复杂光机系统综合性能评估问题，提出了复杂光机系统性能评估 G 因子。在通过 G 因子进行系统综合性能评估的过程中，克服了系统指标类型不同、量纲不同、权重不同、方向性不同等难点，通过 G 因子这一单一无量纲参数直接表征了复杂光机系统的综合性能。G 因子的计算还可以形成类似雷达图这样比较直观形象的表征途径，除了给出整体性能对比，还可直接比较复杂光机系统单一指标的优劣，进而更加全面地分析系统自身、系统和系统之间的性能。

复杂光机系统性能评估因子 G 因子，不但可以用于复杂光机系统综合性能评估，并可扩展应用于类似的复杂系统性能评估。

参考文献：

- [1] 吴小萍,张小勇,孟祥定,等. 复杂系统决策的综合评价方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004,26(12):1807-1811. (WU Xiaoping, ZHANG Xiaoyong, MENG Xiangding, et al. Comprehensive assessment method for the decision making of a complicated system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004,26(12):1807-1811.)
- [2] 王建军,杨德礼. 复杂系统决策的综合评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008,40(8):1337-1340. (WANG Jianjun, YANG Deli. A comprehensive assessment method for complicated system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008,40(8):1337-1340.) doi:10.3321/j.issn:0367-6234.2008.08.035.
- [3] 雷永林,朱智,甘斌,等. 基于仿真的复杂武器系统作战效能评估框架研究[J]. 系统仿真学报, 2020,32(9):1654-1663. (LEI Yonglin, ZHU Zhi, GAN Bin, et al. Combat effectiveness simulation evaluation framework of complex weapon system[J]. Journal of System Simulation, 2020,32(9):1654-1663.) doi:10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0373.
- [4] 贺北方,吴泽宁,杨建水,等. 复杂系统的灰色综合评估研究[J]. 郑州工业大学学报, 1999,20(1):46-49. (HE Beifang, WU Zening, YANG Jianshui, et al. Study on grey comprehensive assessment of complicated system[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1999,20(1):46-49.) doi:10.3969/j.issn.1671-6833.1999.01.014.
- [5] 何大春,黄俊辉,李志杰,等. 港口综合能源系统的 AHP-模糊综合评价法[J]. 上海海事大学学报, 2020,41(2):85-89. (HE Dachun, HUANG Junhui, LI Zhijie, et al. AHP-fuzzy comprehensive evaluation method of port integrated energy system[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2020,41(2):85-89.) doi:10.13340/j.jsmu.2020.02.015.
- [6] 张树杰,黄勇,王静滨,等. 基于熵值和TOPSIS法的装备体系方案优选方法[J]. 兵工自动化, 2016,35(1):20-22,27. (ZHANG Shujie, HUANG Yong, WANG Jingbin, et al. Optimizing method for equipment system based on entropy and TOPSIS method[J]. Ordnance Industry Automation, 2016,35(1):20-22,27.) doi:10.7690/bgzdh.2016.01.006.
- [7] 徐齐利. 熵权法综合评价系统设计与实现[J]. 软件, 2020,41(1):79-84. (XU Qili. Design and implementation of comprehensive evaluation system based on entropy weight method[J]. Computer Engineering & Software, 2020,41(1):79-84.) doi:10.3969/j.issn.1003-6970.2020.01.017.
- [8] 张迪,郭齐胜,李智国. 基于 ANP 的武器装备体系能力有限层次评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015,37(4):817-824. (ZHANG Di, GUO Qisheng, LI Zhiguo. Capability limited-hierarchy evaluation of weapon equipment system based on ANP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015,37(4):817-824.) doi:10.3969/j.issn.1001-506X.2015.04.15.
- [9] 梁家林,熊伟. 基于作战环的武器装备体系能力评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019,41(8):1810-1819. (LIANG Jialin, XIONG Wei. Capabilities assessment of the weaponry system based on combat ring[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019,41(8):1810-1819.) doi:10.3969/j.issn.1001-506X.2019.08.19.

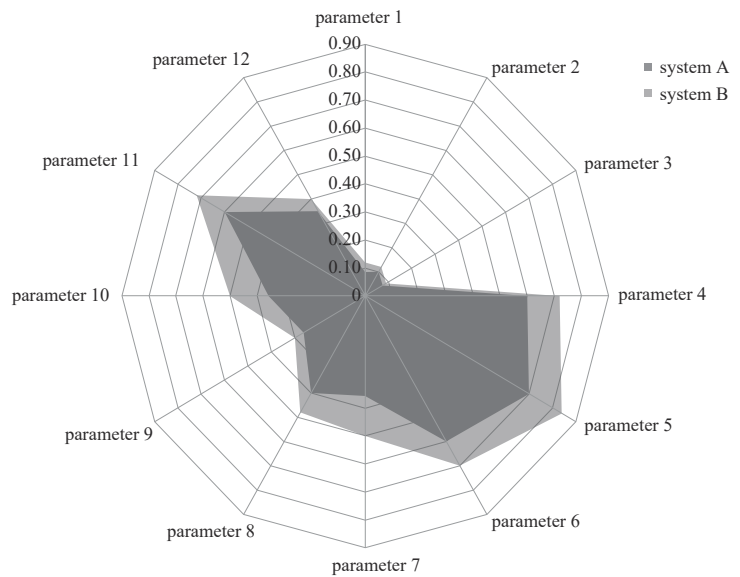


Fig.5 Performance assessment comparison of two typical systems with 12 parameters
图5 两个系统 12 个指标综合性能对比图